



TUGAS AKHIR – TI 141501

**ANALISIS STRATEGI *ECONOMIC DISPATCH* DENGAN
PENDEKATAN *GAME THEORY* PADA SISTEM KELISTRIKAN
JAWA BALI 500 kV**

ALFIYYAH AZZAH MELATI

NRP 2513 100 071

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Erwin Widodo, S.T., M. Eng.

JURUSAN TEKNIK INDUSTRI

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2017



FINAL PROJECT – TI 141501

**ECONOMIC DISPATCH STRATEGY ANALYSIS USING
GAME THEORY APPROACH AT JAVA-BALI 500 kV
ELECTRICITY SYSTEM**

ALFIYYAH AZZAH MELATI

NRP 2513 100 071

Supervisor

Dr. Eng. Erwin Widodo, S.T., M. Eng.

INDUSTRIAL ENGINEERING DEPARTMENT

Faculty of Industrial Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2017

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS STRATEGI *ECONOMIC DISPATCH* DENGAN PENDEKATAN *GAME THEORY* PADA SISTEM KELISTRIKAN JAWA BALI 500 kV

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Jurusan Teknik Industri

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

Oleh:

ALFIYYAH AZZAH MELATI

NRP 2513 100 071

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:



Dr. Eng. Erwin Widodo, S.T., M. Eng.

NIP. 197405171999031002



SURABAYA, JANUARI 2017

**ANALISIS STRATEGI *ECONOMIC DISPATCH* DENGAN
PENDEKATAN *GAME THEORY*
PADA SISTEM KELISTRIKAN JAWA BALI 500 kV**

Nama : Alfyyah Azzah Melati
NRP : 2513100071
Pembimbing : Dr. Eng. Erwin Widodo, S.T., M.Eng.

ABSTRAK

Economic Dispatch adalah menentukan kombinasi pembagian pembebanan pada pembangkit-pembangkit yang ada dalam sistem tenaga listrik secara optimal ekonomis. Permasalahan *economic dispatch* dalam sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV dipengaruhi oleh banyaknya unit pembangkitan yang memiliki karakteristik berbeda-beda. Unit-unit pembangkit yang berperan sebagai *decision maker* memiliki kombinasi strategi yang akan menghasilkan total biaya untuk setiap *decision maker*. Sehingga alokasi pembebanan daya yang dibangkitkan oleh tiap pembangkit harus direncanakan secara kooperatif dengan mempertimbangkan kepentingan dari pihak masing-masing unit. Dalam penelitian ini, strategi pengalokasian pembebanan dicari menggunakan pendekatan *game theory* dengan pembangkit gas dan pembangkit batu bara sebagai *player*. Hasil akhir dari penelitian ini berupa *equilibrium point* dimana pembangkit gas menerapkan strategi TOP (penentuan daya sesuai sistem *Take or Pay*) dan pembangkit batu bara menerapkan strategi PULL (penentuan daya sesuai *demand*). *Win-win solution* antara pembangkit gas dan pembangkit batu bara ini adalah dengan dihasilkannya *value of the game* sebesar Rp 1.303.087.500 untuk pembangkit gas dan sebesar Rp 4.169.879.695 untuk pembangkit batu bara.

Kata kunci: *Economic Dispatch*, *Game Theory*, Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ECONOMIC DISPATCH STRATEGY ANALYSIS USING
GAME THEORY APPROACH
AT JAVA-BALI 500 kV ELECTRICITY SYSTEM**

Student's Name : Alfiyyah Azzah Melati
Student's ID : 2513100071
Supervisor : Dr. Eng. Erwin Widodo, S.T., M.Eng.

ABSTRACT

Economic dispatch is generally defined as the determining combination of allocating generation load of the generation plants at the lowest cost. Economic dispatch at Java Bali 500 kV electricity system influenced by generation plants that have different characteristics. Generation plants act as decision maker which have combinations of strategies that will produce total cost for each decision maker. Therefore it must be planned cooperatively by considering the interest of decision makers. In this research, economic dispatch strategy is structurized using game theory approach. The player of this game is gas plants and coal plants. The result of this research is the equilibrium point which the gas plants apply TOP strategy and the coal plants apply PULL strategy. The win-win solution between gas plants and coal plants is value of the game about Rp 1.303.087.500 for gas plants and Rp 4.169.879.695 for coal plants.

Keywords: Economic Dispatch, Game Theory, Java-Bali 500kV Electricity System

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahillāhirabbil'ālamīn, puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Analisis Strategi *Economic Dispatch* dengan Pendekatan *Game Theory* pada Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV**”.

Laporan Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan studi Strata-1 (S1) dan memperoleh gelar Sarjana Teknik Industri di Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama proses pengerjaan Tugas Akhir, penulis telah menerima banyak dukungan, masukan, serta bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, yaitu Bapak Mawar Mudjiono dan Ibu Cholidha Ulfy serta Dian Saputro yang selalu memberikan doa, motivasi, bantuan, dan dukungan yang tidak terhingga kepada penulis.
2. Novia Rahmah L. R., Muhammad Dzaki S. M., dan Junda Nisrina L. N. selaku adik kandung penulis yang telah memberikan semangat dan bantuan kepada penulis dengan caranya masing-masing.
3. Bapak Dr. Eng. Erwin Widodo, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan semangat, motivasi, arahan, kritik dan saran, serta pembelajaran kehidupan kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Bapak Danang Cipto Wahyuhono selaku pembimbing penulis di Divisi/Bidang Manajemen Energi dan Komersial PT Pembangkitan Jawa Bali Kantor Pusat, Mbak Nur Aini Rachmawati, Bapak Dewanto Wicaksono, Mas Puri Handoko, Mas Rhyienaldi Hardian, segenap karyawan PT PJB lainnya, serta Agung Bayu Aji yang telah banyak membantu dan memberikan kemudahan bagi penulis dalam pengumpulan data dan penyelesaian tugas akhir.
5. Ketua Jurusan Teknik Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Bapak Nurhadi Siswanto, S.T., M.S.I.E., Ph.D.
6. Bapak Dr. Adithya Sudiarmo, S.T., M.T. selaku Koordinator Tugas Akhir atas kelancaran selama proses penyusunan tugas akhir.

7. Bapak Nurhadi Siswanto, S.T., M.S.I.E., Ph.D., Bapak Prof. Ir. Budi Santosa, M.S., Ph.D., Bapak Stefanus Eko Wiratno, M.T., dan Bapak Prof. Suparno selaku dosen penguji saat seminar proposal dan sidang tugas akhir.
8. Segenap dosen dan karyawan Jurusan Teknik Industri ITS yang telah banyak memberikan pelajaran dan pengalaman bagi penulis selama menempuh studi di Jurusan Teknik Industri ITS.
9. Keluarga besar Cyprium TI-29 angkatan 2013 atas pengalaman dan kebersamaan dalam suka duka selama menempuh studi di Jurusan Teknik Industri ITS.
10. Miw, Dwika, Ades, Namira, Diyah, Zizah, Astri, Sally, Icha, Fairuz, Lala, Eli, Evelin, Dea, Desi, Fiki, Ejak, Vincent, Josafat, dan pejuang-pejuang #115 lainnya yang saling memberi semangat, dukungan, motivasi dalam menyelesaikan tugas akhir.
11. Almira Hasna Zulfany dan Karina Smaratantri selaku sahabat *till* jannah penulis atas doa, waktu, cerita, dukungan, nasihat, dan pelajaran hidup yang kita jalani. Allah always with us!
12. Jannet Faradisa N. dan Nindy Azizah selaku sahabat penulis sejak kecil yang selalu menanyakan progress tugas akhir saat pulang Sidoarjo dan senantiasa memberi dukungan kepada penulis, keep istiqomah ya! Datang wisudaku lo!
13. Nabila Hanif Farah selaku sahabat penulis sejak duduk pertama di kelas X atas dukungan dan doa yang diberikan, miss you! Datang wisudaku lo!
14. Achmad Ainul Fu'ad selaku sahabat penulis atas doa, pengalaman, dukungan, bantuan, dan cerita selama perkuliahan. Hamasah memperbaiki ya! 10.10!
15. Dwika Puspa, Afina Thara, Hilda Izzaty, Mita Prastika, Denanda Pratiwi selaku sista-sista sejak SMA yang selalu memberi cerita dan dukungan.
16. Keluarga KWU Foya-Foya yang bertransformasi menjadi KWU Eksklusif atas kebersamaan dalam suka duka, dukungan, dan cerita yang diberikan dari masing-masing orangnya.
17. GAP PF yang nama grupnya selalu berubah dan Yuk Hijrah atas semangat, doa, dan kebersamaan selama belajar, jalan-jalan, dan curhatannya serta BISMILLAH 03:103 atas ilmu agama yang selalu di*share*kan, ketemu di surgaNya yaa !!

18. Keluarga besar UKM Cinta Rebana ITS atas kebersamaannya sejak jaman maba hingga kelulusan. Dulur saklawase rek !!
19. Keluarga besar JMMI ITS, khususnya Departemen Syiar, atas segala pelajaran yang telah diberikan.
20. Seluruh teman dekat penulis yang tidak dapat disebutkan satu-persatu atas segala dukungannya.

Serta berbagai pihak yang tidak dapat penulis sebut satu persatu oleh penulis, terima kasih atas semua doa, dukungan, nasihat, dan semangat yang diberikan kepada penulis, semoga Allah SWT membalas semua kebaikan tersebut. *Āmīn*.

Penulis menyadari bahwa pengerjaan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Kritik dan saran sangat penulis butuhkan untuk perbaikan kedepannya. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi para pembacanya. Sekian yang dapat penulis sampaikan, akhir kata penulis menyampaikan terima kasih.

Surabaya, Januari 2017

Alfiyyah Azzah Melati

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Ruang Lingkup Penelitian.....	5
1.5.1 Batasan.....	6
1.5.2 Asumsi	6
1.6 Sistematika Penulisan	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 <i>Economic Dispatch (ED)</i>	9
2.2 Sistem Tenaga Listrik	11
2.2.1 Sistem Pembangkitan Tenaga Listrik	11
2.2.2 Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV	14
2.3 <i>Game Theory</i>	17
2.3.1 Strategi Permainan dalam <i>Game Theory</i>	17
2.3.2 Nilai Permainan dalam <i>Game Theory</i>	19
2.3.3 <i>Cooperative Games</i>	19
2.3.4 Pencarian Solusi dari Permainan	20
2.4 <i>Literature Review</i>	21
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Tahap Identifikasi dan Pembuatan Model	26

3.1.1	Identifikasi Variabel dan Visualisasi Model Konseptual.....	27
3.1.2	Pengumpulan Data	27
3.1.3	Formulasi Model Matematis	27
3.1.4	Formulasi <i>Game Strategy</i> dan Alternatif Skenario	28
3.1.5	Verifikasi dan Validasi.....	28
3.2	Tahap Pembuatan Model <i>Game Theory</i>	29
3.2.1	<i>Running</i> Alternatif Skenario	29
3.2.2	Formulasi Matrik <i>Payoff</i>	29
3.3	Tahap Analisis Model <i>Game Theory</i>	29
3.4	Tahap Kesimpulan dan Saran	29
BAB 4 PEMBUATAN MODEL		31
4.1	Formulasi Model Konseptual	31
4.2	Pengumpulan Data	32
4.3	Model <i>Economic Load Dispatch</i> Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV.	33
4.4	Pengaplikasian <i>Game Theory</i> pada <i>Economic Dispatch</i>	36
4.4.1	Formulasi Komponen <i>Game Theory</i>	36
4.4.2	Formulasi Skenario ke dalam Model <i>Economic Dispatch</i>	39
4.5	Verifikasi dan Validasi	42
4.6	Pembuatan Model <i>Game Theory</i>	44
4.6.1	<i>Running</i> Alternatif Skenario	44
4.6.2	Formulasi Matrik <i>Payoff</i>	51
BAB 5 ANALISIS		53
5.1	Analisis <i>Equilibrium Point</i>	53
5.2	Perbandingan dengan Kondisi Eksisting	55
BAB 6 KESIMPULAN		57
6.1	Kesimpulan.....	57
6.2	Saran Penelitian Selanjutnya	57
DAFTAR PUSTAKA		59
BIODATA PENULIS		61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 <i>Load Stacking</i> pada 20 September 2017 (Sumber: PT PJB, 2016)....	1
Gambar 1. 2 Peta Beban Sesaat Aliran Daya Malam pada 20 September 2016 pukul 18.00.....	2
Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik.....	11
Gambar 2. 2 Kurva Masukan Keluaran Pembangkit Listrik Termal	12
Gambar 2. 3 Kurva Masukan Keluaran Pembangkit Listrik Hidro	12
Gambar 2. 4 <i>Single Line Base Diagram</i>	16
Gambar 2. 5 Contoh <i>Matrix Payoff</i> Permainan <i>Pure Strategy</i>	18
Gambar 2. 6 Contoh Penyelesaian Menggunakan Metode Grafis	21
Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> Metodologi Penelitian	25
Gambar 4. 1 Model Konseptual <i>Economic Dispatch</i> Sistem Kelistrikan Jawa Bali	32
Gambar 5. 1 Pengisian <i>Payoff</i> pada Gambit	53
Gambar 5. 2 Hasil <i>Running</i> Gambit untuk Permasalahan <i>Economic Dispatch</i>	54

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tabel Persebaran <i>Bus</i> pada Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV	15
Tabel 2.2 <i>Literature Review</i> Penelitian.....	22
Tabel 4. 1 Daftar Blok dan Kapasitas Daya Pembangkit 500 kV dalam MW	32
Tabel 4. 2 Beban Per Subsistem 500 kV	33
Tabel 4. 3 Fungsi Biaya Pembangkitan Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV	35
Tabel 4. 4 Alternatif Strategi dari Setiap Pemain	37
Tabel 4. 5 Rekap Pengelompokan GITET untuk Strategi GROUP	38
Tabel 4. 6 Alternatif Skenario dari Setiap Kombinasi Strategi.....	38
Tabel 4. 7 Keterangan Skenario Pengambilan Keputusan	39
Tabel 4. 8 Validasi Model.....	44
Tabel 4. 9 <i>Running</i> Skenario 1 (GROUP-GROUP).....	45
Tabel 4. 10 <i>Running</i> Skenario 2 (GROUP-PULL)	46
Tabel 4. 11 <i>Running</i> Skenario 3 (TOP-GROUP).....	47
Tabel 4. 12 <i>Running</i> Skenario 4 (TOP-PULL)	48
Tabel 4. 13 <i>Running</i> Skenario 5 (PULL-GROUP)	49
Tabel 4. 14 <i>Running</i> Skenario 6 (PULL-PULL)	50
Tabel 4. 15 Matrik <i>Payoff</i> Permasalahan <i>Economic Dispatch</i>	51

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

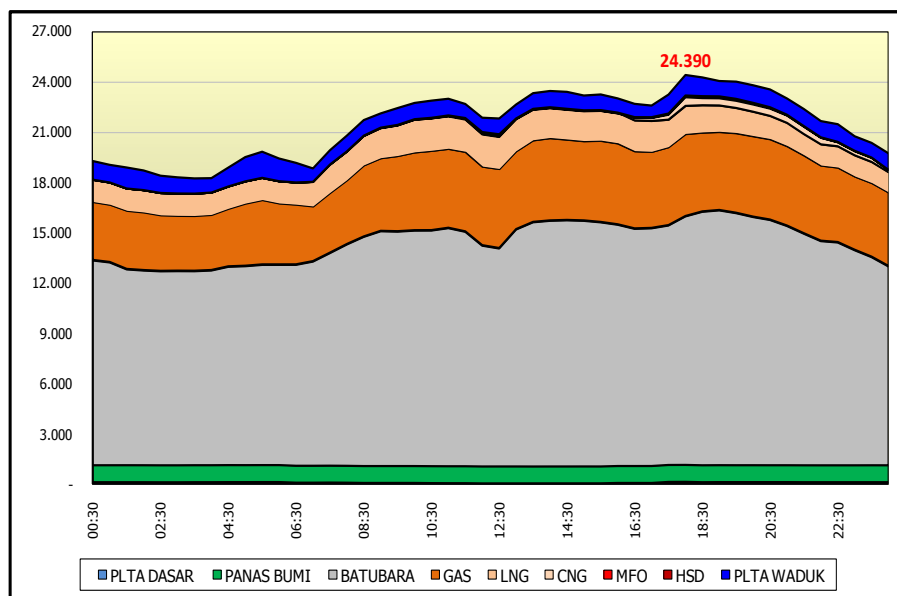
BAB 1

PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan akan dijelaskan mengenai hal-hal yang mendasari dilakukannya penelitian serta identifikasi masalah penelitian yang meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, serta batasan dan asumsi yang digunakan dalam penelitian.

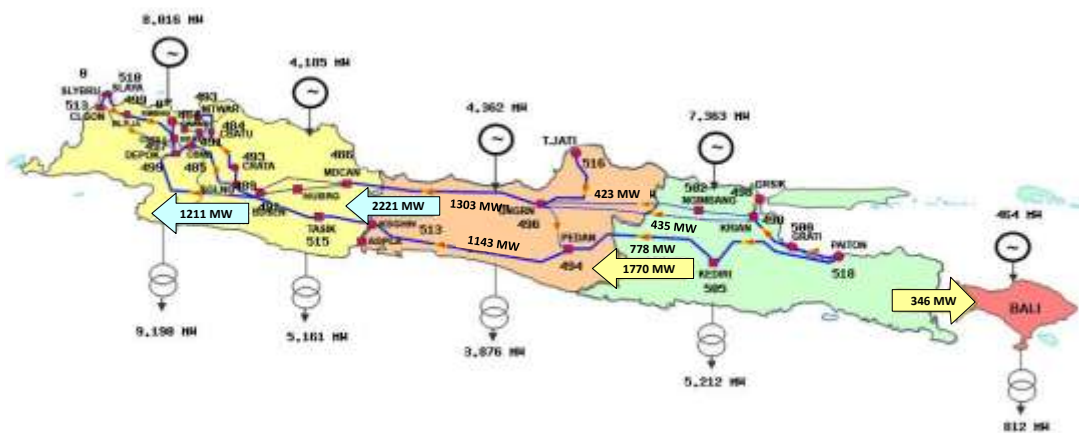
1.1 Latar Belakang

Sistem ketenagalistrikan merupakan sekumpulan pusat listrik dan pusat beban yang satu sama lain dihubungkan oleh jaringan transmisi sehingga menjadi sebuah kesatuan interkoneksi. Sistem tenaga listrik Jawa Bali dibagi menjadi empat region yaitu Jakarta Raya dan Baten disebut Region 1, Jawa Barat disebut Region 2, Jawa Tengah dan D.I.Y. disebut Region 3, serta Jawa Timur dan Bali disebut Region 4. Masing-masing region memiliki karakteristik beban dan komposisi pembangkit yang berbeda-beda. Karakteristik beban setiap jamnya dan komposisi pembangkit untuk negara berkembang seperti Indonesia bisa dilihat pada Gambar 1.1



Gambar 1. 1 *Load Stacking* pada 20 September 2016 (Sumber: PT PJB, 2016)

Strategi penggunaan unit-unit pembangkit dengan berbagai energi primer (batu bara, hidro, gas, panas bumi, dll) yang disebut *mixed energy* bertujuan untuk menjaga kualitas dan *secure* energi listrik saat terjadi beban puncak pada waktu-waktu tertentu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1 yaitu beban puncak terjadi pada malam hari pukul 18.00 dengan total sebesar 24.390 MW. Total beban puncak tersebut berasal dari empat region yang telah disebutkan sebelumnya. Berikut gambaran sistem kelistrikan Jawa Bali dalam peta beban sesaat disertai dengan aliran dayanya.



Gambar 1. 2 Peta Beban Sesaat Aliran Daya Malam pada 20 September 2016 pukul 18.00 (Sumber: PT PJB, 2016)

Aliran daya yang ditunjukkan dengan tanda panah pada peta beban sesaat mengarah ke region dengan kebutuhan beban yang lebih besar dibanding *supply* energi listriknya. Artinya terdapat ketidakseimbangan antara *supply* dan *demand* pada wilayah barat (region 1) dikarenakan karakteristik beban region Jakarta Raya dan Banten adalah beban industri di mana banyak terdapat aktivitas industri dan kenegaraan yang mengharuskan kestabilan listrik. Berbeda dengan karakteristik beban region lainnya yang merupakan beban rumah tangga. Aliran daya energi listrik akan bergantung pada komposisi operasi pembangkit dan topologi jaringan. Sehingga diperlukan perencanaan pembebanan untuk setiap unit pembangkit.

Adanya sistem pembangkitan tenaga listrik modern yang dikenal sebagai sistem interkoneksi memungkinkan letak generator yang dioperasikan antara satu dengan yang lain berjauhan namun terdapat suatu jaringan transmisi sebagai penghubung (Anesya, 2012). Sistem kelistrikan Jawa Bali memegang peranan

sebagai sistem interkoneksi terbesar di Indonesia (Kanata, 2013). Tujuan dari sistem interkoneksi antara lain adalah untuk menjaga kontinuitas penyediaan tenaga listrik karena apabila salah satu pusat pembangkit mengalami gangguan masih dapat disuplai dari pembangkit lain yang terhubung secara interkoneksi. Tujuan lainnya adalah saling memperingan beban yang harus ditanggung oleh suatu pusat listrik. Karena operasi pusat-pusat listrik dalam sistem interkoneksi saling mempengaruhi satu sama lain, maka perlu ada koordinasi operasi. Koordinasi operasi ini dilakukan oleh pusat pengatur beban.

Dalam sistem ketenagalistrikan, sistem pembangkit merupakan salah satu komponen utama yang penting sebagai hulu dari penyaluran tenaga listrik yang kegiatannya memproduksi tenaga listrik. Sistem pembangkit tergantung pada kontrol pengoptimalan penggunaan bahan bakar. Padahal konsumsi bahan bakar pembangkitan menjadi suatu masalah serius karena biaya bahan bakar merupakan komponen biaya penyediaan tenaga listrik terbesar yaitu sekitar 60 % dari biaya total dan 85 % dari 60 % biaya bahan bakar tersebut adalah biaya bahan bakar untuk pembangkit *thermal* (Kanata, 2013). Oleh karena itu, perlu dilakukan perencanaan yang ekonomis untuk penghematan biaya operasional pembangkitan dan terpenuhinya permintaan beban sistem dengan menentukan kombinasi besar daya yang harus dibangkitkan dari masing-masing unit pembangkit.

Economic Dispatch adalah pembagian pembebanan pada pembangkit-pembangkit yang ada dalam sistem tenaga listrik secara optimal ekonomis, yaitu pada harga beban sistem tertentu dengan total biaya operasi yang minimal (Hazi, Rosmaliati, & Misbahuddin, 2014). Definisi dari *Economic Dispatch* dalam EPAct bagian 1234 adalah “Pengoperasian fasilitas pembangkitan untuk menghasilkan energi pada biaya rendah, terpercaya untuk melayani konsumen, memperhatikan adanya batasan operasional dari pembangkit dan fasilitas transmisi”. Dalam *Economic Dispatch* ditentukan kombinasi pembagian beban secara optimal untuk unit-unit pembangkitan setiap terjadi perubahan beban sehingga diperoleh total biaya operasi yang minimum dengan tetap memperhatikan batas-batas teknis dan operasional yaitu pembangkit minimum dan maksimum setiap unit generator dan permintaan beban serta rugi-rugi transmisi (Wood & Wollenberg, 1996).

Pada sistem kelistrikan Jawa Bali, alokasi pembebanan pembangkit diatur oleh pihak P2B (Pusat Pengatur Beban) untuk menghasilkan pembagian beban secara ekonomis. Terdapat beberapa kepemilikan pembangkit yang berkontribusi dalam sistem Jawa Bali seperti IPP, IP, PJB, dan PLN. Dalam pengalokasian pembebanan, IPP menjadi prioritas untuk dibangkitkan terlebih dahulu dikarenakan sistem kontrak. Total *demand* yang dibutuhkan akan dikurangi dengan kapasitas IPP, setelah itu sisanya dibagi untuk pembangkit dari kepemilikan lainnya berdasarkan sistem *Merit Order* dengan mempertimbangkan komponen biaya pembangkitan (Komponen ABCD).

Permasalahan *economic dispatch* dalam sistem kelistrikan Jawa Bali dipengaruhi oleh banyaknya unit pembangkitan dimana masing-masing unit pembangkitan memiliki kapasitas dan karakteristik yang berbeda. Unit-unit pembangkit tersebut saling terinterkoneksi dalam memenuhi kebutuhan permintaan daya. Sehingga alokasi pembebanan daya yang dibangkitkan oleh tiap pembangkit harus direncanakan secara kooperatif dengan mempertimbangkan kepentingan dari pihak masing-masing unit. Hal tersebut akan lebih menguntungkan semua pihak dan dapat diperoleh nilai yang setimbang dalam mencapai tujuan.

Penyelesaian permasalahan *Economic Dispatch* telah banyak dilakukan dengan berbagai macam metode. Banyak penelitian sebelumnya yang menggunakan metode metaheuristik seperti menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) oleh Rahman (2012) dan Wardana (2014), *Genetic Algorithm* (GA) dan *micro-Genetic Algorithm* (μ -GA) oleh Amruddin (2011), *Ant Colony Optimization* (ACO) oleh Mahatma (2013), *Differential Evolution* (DE) oleh Anesya (2012), *Ion Motion Optimization* oleh Aji (2016), dan lain-lain. Metode lain yang digunakan yaitu dengan metode *linear programming* seperti yang dilakukan oleh Farag (1995), serta menggunakan turunan kalkulus seperti yang dilakukan oleh Cekdin (2011).

Penyelesaian *Economic Dispatch* menggunakan berbagai macam metode metaheuristik belum dapat mengakomodir kepentingan banyak pihak. Seiring dengan berkembangnya pengetahuan, metode optimasi tersebut dapat dikombinasikan untuk penyelesaian *economic dispatch* dengan memperhatikan kepentingan banyak pihak yaitu pembangkit gas dan pembangkit batu bara pada

sistem kelistrikan Jawa Bali. Pada literatur terdahulu yang dilakukan oleh Nezihe Yildiran dan Emin Tacer di tahun 2015, teori permainan yang diaplikasikan pada pembangkit Turki menghasilkan biaya pembangkitan yang lebih kecil dibanding dengan metode *Genetic Algorithm* dan *Lagrange Function*. Sehingga dengan menggunakan pendekatan teori permainan pada sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV, diharapkan ditemukan kombinasi jumlah daya yang optimal ekonomis dengan mempertimbangkan kepentingan masing-masing pihak.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas pada penelitian tugas akhir ini adalah bagaimana menentukan alokasi pembebanan yang lebih baik dengan memperhatikan kepentingan pembangkit gas dan pembangkit batu bara sehingga kebutuhan beban pada sistem kelistrikan Jawa Bali dapat terpenuhi dengan biaya pembangkitan minimum.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui alokasi pembebanan pembangkit dengan biaya minimum.
2. Merekomendasikan keputusan yang dapat memberikan *win-win solution* antara pembangkit gas dan pembangkit batu bara terkait *economic dispatch* pada sistem kelistrikan Jawa Bali.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang ingin diperoleh dari penelitian tugas akhir ini adalah untuk memberikan alternatif strategi alokasi pembebanan yang lebih baik dengan biaya operasional pembangkitan yang lebih minimum.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Berikut merupakan ruang lingkup dari penelitian tugas akhir ini yang terdiri dari batasan dan asumsi yang digunakan saat penelitian.

1.5.1 *Batasan*

Adapun batasan yang digunakan di dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian dilakukan pada sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV dari komponen pembangkit hingga jaringan transmisi.
2. Elemen biaya yang digunakan hanya elemen biaya bahan bakar.
3. Data yang digunakan adalah data *forecast* penjualan pada tanggal 5 Januari 2016 pukul 12.00.

1.5.2 *Asumsi*

Adapun asumsi yang digunakan di dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Tidak terjadi rugi-rugi transmisi saat pendistribusian listrik ke pusat beban.
2. Nilai kapasitas minimal dari pembangkit gas diambil dari nominal *Take Or Pay* (TOP) dari *supplier* gas.

1.6 **Sistematika Penulisan**

Laporan tugas akhir ini terdiri dari enam bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut.

BAB 1 PENDAHULUAN

Pada Bab Pendahuluan dijelaskan mengenai hal-hal yang mendasari dilakukannya penelitian serta identifikasi masalah penelitian yang meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, serta batasan dan asumsi yang digunakan dalam penelitian.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Pada Bab Tinjauan Pustaka berisi tentang uraian teori dari permasalahan dan metode yang digunakan yang diperoleh dari referensi yang akan digunakan sebagai landasan dalam kegiatan penelitian tugas akhir ini.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada Bab Metodologi Penelitian akan dijelaskan secara detail mengenai tahapan-tahapan yang dilakukan dalam melakukan penelitian tugas akhir. Metodologi penelitian ini menggambarkan alur pelaksanaan penelitian dan kerangka berpikir yang digunakan peneliti selama pelaksanaan penelitian.

BAB 4 PEMBUATAN MODEL

Pada Bab Pembuatan Model akan dijelaskan mengenai tahapan pembuatan model *economic dispatch* (ED) pada sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV dan strukturisasi metode *game theory* yang digunakan untuk menyelesaikan masalah *economic dispatch* (ED).

BAB 5 ANALISIS

Pada Bab Analisis akan dilakukan analisis terhadap keputusan yang sebaiknya diambil untuk mendapatkan solusi terbaik yang *win-win solution* bagi setiap pemangku kepentingan.

BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

Pada Bab Kesimpulan dan Saran akan dilakukan penarikan kesimpulan dari hasil pelaksanaan penelitian tugas akhir sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai serta saran-saran yang dapat diberikan untuk perbaikan penelitian selanjutnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab tinjauan pustaka akan diuraikan teori dari permasalahan dan metode penyelesaian yang diperoleh dari referensi untuk digunakan sebagai landasan dalam kegiatan penelitian tugas akhir.

2.1 *Economic Dispatch (ED)*

Economic Dispatch adalah pembagian pembebanan pada pembangkit-pembangkit yang ada dalam sistem tenaga listrik secara optimal ekonomis, yaitu pada harga beban sistem tertentu dengan total biaya operasi yang minimal (Hazi, Rosmaliati, & Misbahuddin, 2014). Definisi dari *Economic Dispatch* dalam EPAct bagian 1234 adalah “Pengoperasian fasilitas pembangkitan untuk menghasilkan energi pada biaya rendah, terpercaya untuk melayani konsumen, memperhatikan adanya batasan operasional dari pembangkit dan fasilitas transmisi”. Menurut Singh & Kumar (2015), *Economic Dispatch* juga diartikan sebagai masalah alokasi daya yang dibebankan kepada unit pembangkit untuk dibangkitkan dengan meminimalkan total biaya pembangkitan dan memenuhi batasan-batasan yang ada. Besar beban pada suatu sistem tenaga selalu berubah setiap periode waktu tertentu, oleh karena itu untuk menyuplai beban secara ekonomis, *Economic dispatch* dilakukan pada tiap besar beban tersebut. Penerapan ED pada sistem tenaga listrik digunakan untuk menentukan kombinasi *output* tenaga yang optimal untuk semua unit pembangkit dengan meminimasi total biaya bahan bakar dan memenuhi beberapa batasan seperti kapasitas pembangkit dan jumlah pembangkitan minimum agar semua permintaan dapat terpenuhi.

Pada pembangkitan energi listrik, biaya bahan bakar (*fuel cost*) merupakan komponen biaya penyediaan tenaga listrik terbesar yaitu sekitar 60 % dari biaya total. Setiap pembangkit memiliki karakteristik *fuel cost* yang berbeda-beda sesuai dengan jenis bahan bakar yang digunakan. Optimasi biaya operasi yaitu biaya *fuel cost* sangat mempengaruhi biaya produksi energi listrik. Dalam kondisi normal,

kapasitas total dari pembangkit lebih besar dari daya beban (P_{load}) dan rugi-rugi transmisi (P_{loss}).

Secara umum, tujuan utama dari *Economic dispatch* adalah meminimalkan konsumsi bahan bakar dari pembangkit pada sistem dengan menentukan daya *output* setiap unit pembangkit. Model matematis dari permasalahan *Economic dispatch* menurut Farag (1995) adalah sebagai berikut.

Fungsi tujuan : minimasi total biaya pembangkitan (biaya bahan bakar)

$$F_T = \text{MIN} \sum_{i=1}^N (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (2.1)$$

Keterangan : F_T = total biaya bahan bakar
 a_i, b_i, c_i = koefisien persamaan biaya pembangkit i
 P_i = daya yang dibangkitkan pembangkit i
 N = jumlah pembangkit

Persamaan biaya pembangkitan untuk setiap pembangkit didapatkan dari hasil regresi non linier karakteristik *output* (berupa biaya bahan bakar) dan *input* (berupa daya *output* yang ingin dihasilkan). Persamaan dihasilkan berdasarkan :

- Percobaan tentang efisiensi dari pembangkit
- Data historis mengenai operasi dari unit pembangkit
- Data desain dari unit pembangkit yang diberikan pabrik produsen.
- Penelitian mengenai *economic dispatch* sebelumnya

Konstrain 1 : Keseimbangan Daya

$$\sum_{i=1}^n P_i \geq P_D + P_L \quad \text{dengan} \quad P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j \quad (2.2)$$

Keterangan : P_D = total *demand* sistem
 P_L = besar *losses* yang terjadi
 B_{ij} = *matrix* elemen *losses* dari pembangkit i ke j

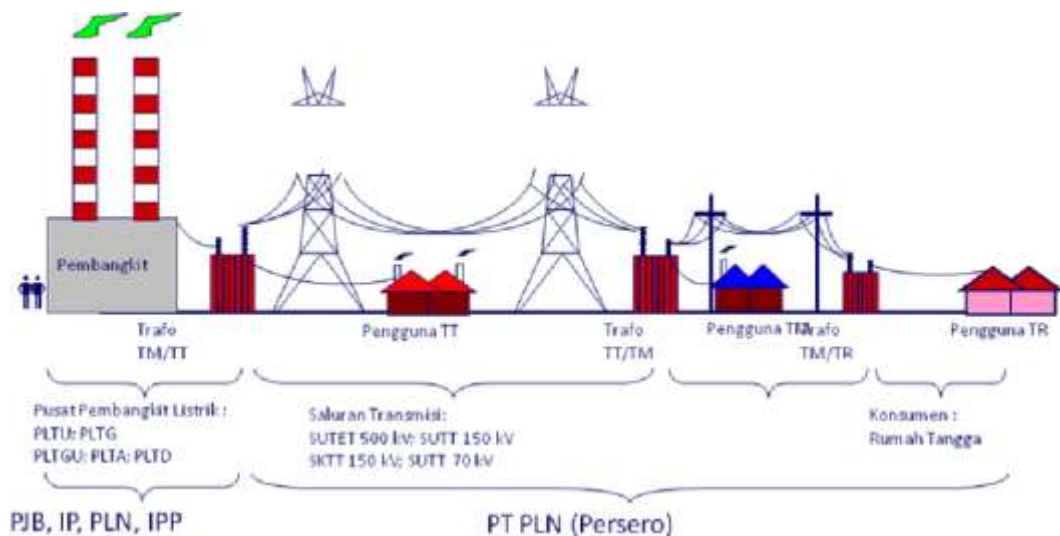
Konstrain 2 : Kapasitas Pembangkit

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (2.3)$$

Keterangan : P_i^{min} = kapasitas daya minimum pembangkit i
 P_i^{max} = kapasitas daya maksimum pembangkit i

2.2 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan sekumpulan pusat listrik dan pusat beban yang satu sama lain dihubungkan oleh sistem penyaluran sehingga menjadi sebuah kesatuan interkoneksi. Tiga bagian utama dari sistem tenaga listrik berupa sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi tidak dapat dipisahkan untuk memenuhi tujuan operasi sistem tenaga listrik seperti gambar berikut.



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

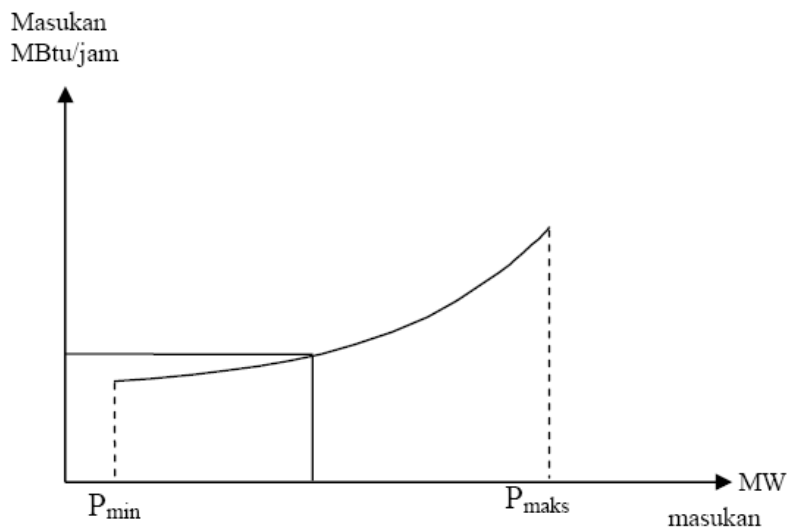
Energi listrik dibangkitkan oleh pembangkit tenaga listrik dimana sumber energi utamanya berasal dari sumber energy primer yang tersedia dari alam untuk selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik. Energi listrik dari pembangkitan kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi dan didistribusikan ke instalasi pengguna tenaga listrik dengan menggunakan saluran distribusi.

2.2.1 Sistem Pembangkitan Tenaga Listrik

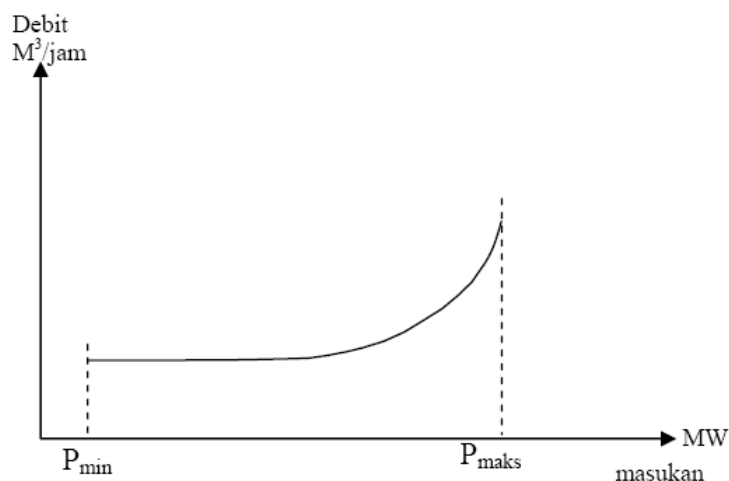
Sistem pembangkitan merupakan salah satu komponen utama yang penting sebagai hulu dari penyaluran tenaga listrik yang kegiatannya memproduksi tenaga listrik. Sistem pembangkitan terbagi dalam dua kelompok besar yaitu pembangkit listrik termal (PLTU, PLTG, PLTGU, PLTD, PLTP, dll) dan pembangkit listrik

hidro (PLTA). Kedua kelompok pembangkit tersebut memiliki karakteristik yang berbeda ditunjukkan oleh kurva masukan keluarannya.

Pada pembangkit termal, karakteristik masukannya adalah bahan bakar yang dinyatakan dalam satuan energi per jam (MBtu/h) dengan keluaran daya yang dibangkitkan (MW). Sedangkan untuk pembangkit hidro atau tenaga air, masukannya adalah jumlah air yang masuk dinyatakan dalam m^3/jam dan keluarannya adalah daya yang dibangkitkan dalam MW. Kurva masukan keluaran ini dapat dinyatakan dengan fungsi polinomial. Kurva masukan keluaran tidak melalui titik nol karena adanya biaya putar pembangkit pada beban nol.



Gambar 2. 2 Kurva Masukan Keluaran Pembangkit Listrik Termal



Gambar 2. 3 Kurva Masukan Keluaran Pembangkit Listrik Hidro

Biaya pembangkitan merupakan perkalian dari biaya bahan bakar dan kebutuhan bahan bakar setiap jam. Selain biaya pembangkitan, dalam biaya operasi juga terdapat biaya tenaga kerja, biaya pemeliharaan, biaya transportasi bahan bakar, dll yang sulit untuk diinterpretasikan secara langsung dalam karakteristik *input-output* pembangkit *thermal* (Miller et al., 1994).

Biaya pokok produksi pembangkitan tenaga listrik atau biaya operasi terdiri dari 4 komponen. Komponen biaya A adalah *fixed cost* atau biaya yang harus tetap dikeluarkan terlepas dari pembangkit tersebut beroperasi atau tidak dalam bentuk modal. Contoh yang termasuk dalam komponen biaya ini adalah *capital cost* (biaya konstruksi pembangkit). Komponen biaya B adalah *fixed cost* dalam bentuk operasional. Contoh yang termasuk dalam komponen biaya ini adalah biaya manajemen, gaji pegawai, material dan jasa untuk *repair and replace* yang berkala, *general administration*, asuransi, dll. Komponen biaya C adalah *variable cost* untuk bahan bakar yang digunakan oleh pembangkit listrik. Biaya ini tergantung pada jenis bahan bakar dan jumlah daya yang ingin dibangkitkan. Komponen biaya D adalah *variable cost* dalam operasi dan pemeliharaan. Contoh biaya yang termasuk dalam komponen ini adalah biaya untuk pelumas, air, *chemical*, pemeliharaan rutin, dll.

Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik, terdapat tiga hal yang menjadi pokok perhatian untuk mencapai tujuannya yaitu ekonomi, keandalan (*security*), dan kualitas. Urutan prioritas dari sasaran tersebut dapat berubah bergantung kondisi *real time*. Efisiensi produksi tenaga listrik diukur dari tingkat biaya yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik dengan menggunakan sistem *Merit Order* dimana pembangkit dengan biaya termurah lebih diprioritaskan untuk beroperasi hingga beban tenaga listrik tercukupi, dibanding pembangkit dengan biaya yang lebih mahal. Pada sistem *Merit Order*, terdapat urutan prioritas pengoperasian pembangkit. Saat kondisi *base load*, maka PLTA akan dioperasikan terlebih dahulu karena biayanya paling murah. Jika *load* bertambah hingga *medium load*, maka PLTU batu bara akan dioperasikan selanjutnya. Saat mencapai *peak load* atau beban puncak, maka pembangkit yang dioperasikan berikutnya adalah PLTU gas, bbm, atau lainnya. Hal ini dikarenakan biaya bahan bakar gas lebih mahal dibanding batu bara.

2.2.2 Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV

Sistem tenaga listrik Jawa Bali dihubungkan oleh Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV dan Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV dan 70 kV. Sistem tenaga listrik Jawa Bali dibagi menjadi empat region yaitu Jakarta Raya dan Banten disebut Region 1, Jawa Barat disebut Region 2, Jawa Tengah dan D.I.Y. disebut Region 3, serta Jawa Timur dan Bali disebut 4. Region-region pada sistem dihubungkan oleh sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV sebagai sistem terinterkoneksi yang merupakan tulang punggung *supply* daya sistem tenaga listrik Jawa Bali.

Pada sistem interkoneksi terdapat banyak pusat listrik dan banyak pusat beban (yang disebut gardu induk/GI) yang dihubungkan satu sama lain oleh saluran transmisi. Daya berkapasitas besar dialirkan oleh pembangkit-pembangkit utama dari Region 1 sampai Region 4 melalui saluran transmisi 500 kV, yang kemudian di Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 500 kV diturunkan tegangannya menjadi 150 kV melalui *Inter Bus Transformer* (IBT) 500/150 kV.

Tujuan dari sistem interkoneksi antara lain adalah untuk menjaga kontinuitas penyediaan tenaga listrik karena apabila salah satu pusat pembangkit mengalami gangguan masih dapat disuplai dari pembangkit lain yang terhubung secara interkoneksi. Tujuan lainnya adalah saling memperingan beban yang harus ditanggung oleh suatu pusat listrik.

Sebagian dari sistem interkoneksi yang terdiri dari sebuah pusat listrik, dua buah GI beserta subsistem distribusinya. Karena operasi pusat-pusat listrik dalam sistem interkoneksi saling mempengaruhi satu sama lain, maka perlu ada koordinasi operasi. Koordinasi operasi ini dilakukan oleh pusat pengatur beban. Koordinasi terutama meliputi:

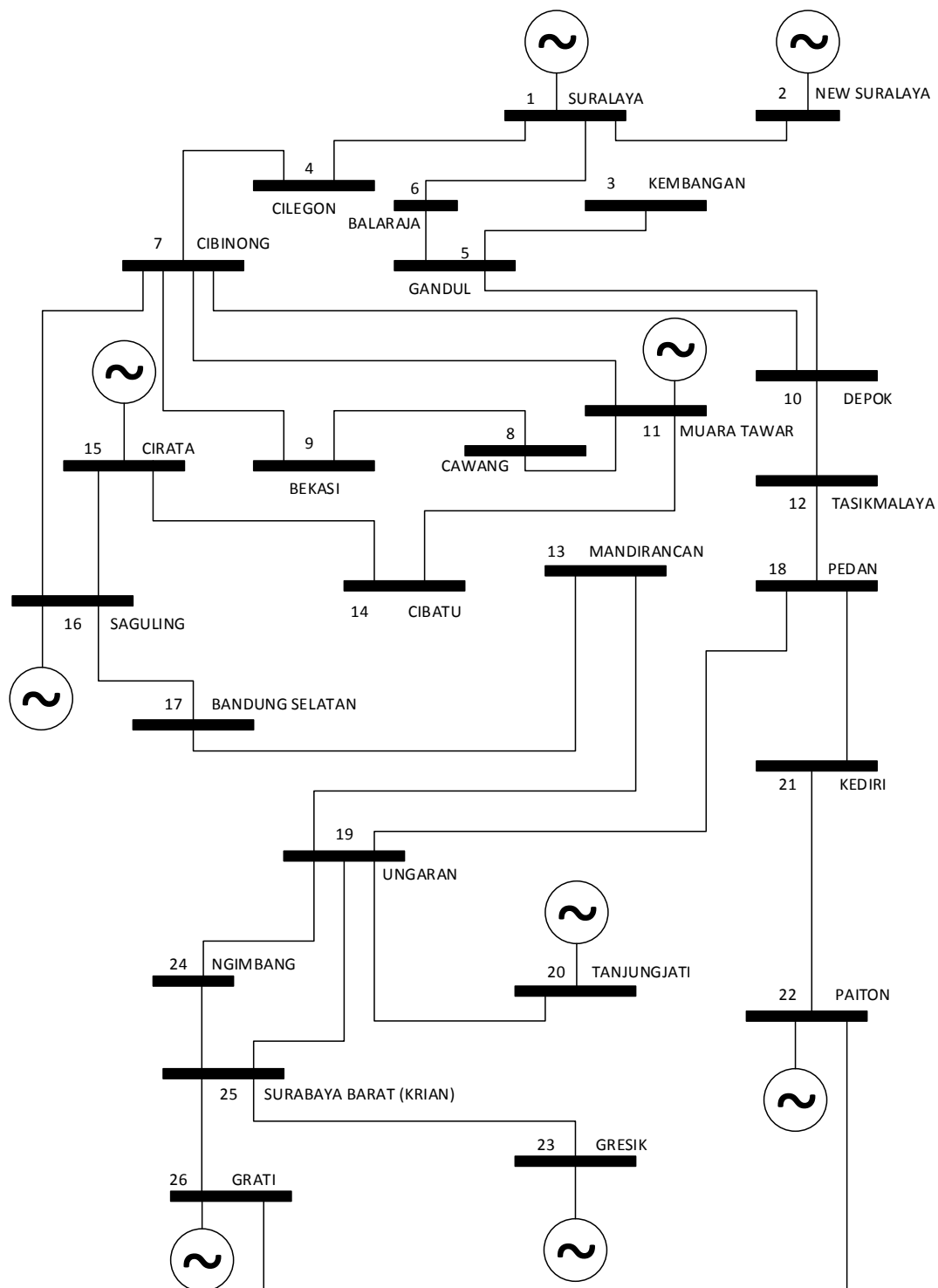
1. Koordinasi dalam pemeliharaan
2. Pembagian beban secara ekonomis
3. Pengaturan frekuensi
4. Pengaturan tegangan
5. Prosedur mengatasi gangguan

Sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV terdiri atas 26 *bus* dengan 29 saluran dan 9 *bus* pembangkit. Persebaran *bus* pada sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV dibagi berdasarkan provinsi seperti pada tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Tabel Persebaran *Bus* pada Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV

BUS PEMBANGKIT		
Provinsi	Daftar Bus Pembangkit	Daftar Bus Load (Pusat Beban)
Banten	Suralaya, New Suralaya	Cilegon, Balaraja
DKI Jakarta	-	Kembangan, Gandul, Cawang
Jawa Barat	Muara Tawar, Cirata, Saguling	Cibinong, Bekasi, Depok, Tasikmalaya, Mandirancan, Cibatu, Bandung Selatan
Jawa Tengah dan Jogjakarta	Tanjung Jati	Pedan, Ungaran
Jawa Timur	Paiton, Gresik, Grati	Kediri, Ngimbang, Surabaya Barat (Krian)

Pembangkit-pembangkit yang terpasang dalam sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV ini terdiri dari 2 pembangkit *hidro* yaitu PLTA Cirata, PLTA Saguling, dan 7 pembangkit *thermal* yaitu PLTU Suralaya, PLTU New Suralaya, PLTU Tanjung Jati, PLTG Muata Tawar, PLTGU Gresik, PLTGU Paiton, dan PLTGU Grati. Berikut gambaran sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV dalam *single line base diagram*.



Gambar 2. 4 *Single Line Base Diagram* (Sumber: PT PJB, 2016)

2.3 *Game Theory*

Teori Permainan adalah suatu metodologi dengan pendekatan matematis untuk merumuskan dan menganalisis situasi persaingan dan konflik antara berbagai persaingan dalam pengambilan keputusan secara interaktif. Pengambilan keputusan dengan teori permainan melibatkan lebih dari satu *decision maker* (atau disebut *player/pemain*) yang memiliki tujuan berbeda-beda, dimana keputusan masing-masing mempengaruhi hasil untuk semua *decision maker*. Interaktivitas ini membedakan teori permainan dari teori keputusan standar, yang fokus utamanya hanya melibatkan satu *decision maker*. Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan, setiap pemain dapat memiliki banyak pilihan strategi yang dapat diterapkan. Hal ini diterapkan sebagai upaya untuk memprediksi perilaku pemain dalam mencapai tujuan masing-masing. (Maschler, et al., 2013)

Beberapa komponen – komponen dari *game theory* adalah sebagai berikut:

- *Games*: Situasi interaktif dan strtegis dimana terdapat konflik dan kerja sama antar pemain.
- *Pemain*: Pengambil keputusan didalam *game*. Pemain dapat berupa individu atau kelompok.
- *Strategi*: Keseluruhan kemungkinan keputusan yang dapat diambil oleh pemain dalam *game*.
- *Payoff value*: Hasil yang didapat dari keputusan yang dipilih bersama oleh pemain dalam *game*.

Salah satu asumsi dasar didalam *game theory* adalah semua pemain bersifat rasional. Jumlah pemain dalam *game theory* dibagi menjadi dua jenis yaitu *two person game* dimana permainan diikuti oleh sepasang atau dua orang pemain dan *N-person game* dimana permainan diikuti oleh lebih dari dua pemain. Pemain selalu memilih keputsan terbaik dengan hasil yang diinginkan. Pemain tidak memilih suatu keputusan berdasarkan suka atau tidak suka.

2.3.1 *Strategi Permainan dalam Game Theory*

Penyelesaian masalah dalam *game theory* biasanya menggunakan dua karakteristik strategi, yaitu:

1. *Pure Strategy*

Ketika permainan dilakukan dalam bentuk normal, tiap pemain memilih strategi yang akan menghasilkan hasil yang terbaik bagi diri sendiri (Hogarth, 2006). Kedua strategi membentuk pasangan dan dapat dilambangkan dengan (α_i, β_i) . Contoh pada Gambar 2.6 dapat menunjukkan bagaimana setiap pemain dapat memilih strategi pada permainan *pure strategy*. Nilai yang berada di dalam *matrix* merupakan nilai *payoff* atau konsekuensi dari setiap pengambilan keputusan atau strategi. Nilai *payoff* positif menyatakan keuntungan yang diterima Pemain 1 dan kerugian untuk Pemain 2. Jika nilainya negatif menyatakan kerugian untuk Pemain 1 dan keuntungan untuk Pemain 2. Pemain 1 adalah pemain yang bermain dalam strategi baris dan Pemain 2 adalah pemain yang bermain dalam strategi kolom.

		<i>Pemain 2</i>			
		β_1	β_2	β_3	β_4
<i>Pemain 1</i>	α_1	14	2	1	2
	α_2	-1	3	9	11
	α_3	4	3	4	20
	α_4	8	6	7	16

Gambar 2. 5 Contoh *Matrix Payoff* Permainan *Pure Strategy*

Dari contoh pada Gambar 2.6 dapat dilihat bahwa Pemain 2 menginginkan mendapatkan hasil nilai *payoff* -1 pada strategi (α_2, β_1) . Karena dia akan mendapatkan 1 dan membuat Pemain 1 akan rugi sebanyak 1.

2. *Mixed Strategy*

Jika permainan yang dilakukan tidak memiliki *saddle point* atau titik kesetimbangan, pemain dalam permainan dapat melakukan kombinasi strategi dengan melakukan beberapa strategi secara repetitif dengan distribusi peluang tertentu. Berikut ini merupakan penggambaran hal ini secara matematis.

X = probabilitas pemain 1 menggunakan strategi i ($i = 1, 2, \dots, m$),

Y = probabilitas pemain 2 menggunakan strategi j ($j = 1, 2, \dots, n$).

dengan m dan n adalah jumlah strategi dari setiap pemain (Hillier & Lieberman, 2000).

2.3.2 Nilai Permainan dalam Game Theory

Terdapat dua jenis tipe *game* dalam *game theory* berdasarkan jumlah pembayaran atau nilai permainannya, yaitu:

1. *Zero Sum Games*

Zero Sum Games adalah tipe permainan yang menggambarkan jumlah keuntungan yang diterima oleh Pemain 1 akan berjumlah sama dengan kerugian yang dirasakan oleh Pemain 2 dan sebaliknya. Atau, jika angka keduanya pada *matrix payoff* jika dijumlahkan bernilai 0. Salah satu permainan yang bersifat *zero sum games* adalah permainan kartu poker dimana jumlah uang yang diterima pemenang sama dengan jumlah uang yang dikeluarkan oleh pemain yang kalah.

2. *Non Zero Sum Games*

Non Zero Sum Games adalah tipe permainan yang menggambarkan jumlah keuntungan yang diterima oleh Pemain 1 tidak selalu berjumlah sama dengan kerugian yang dirasakan oleh Pemain 2 dan sebaliknya. Tipe permainan seperti ini adalah tipe permainan yang sering ditemui di kehidupan sehari-hari karena keputusannya bersifat dinamis dimana bisa saja jika memilih pasangan strategi tertentu keduanya akan menerima keuntungan atau keduanya merasakan kerugian. Biasanya, tipe permainan yang digolongkan ke dalam *non zero sum games* merupakan permainan yang bersifat kompetitif dan tidak memiliki satu strategi optimal atau menggunakan *mixed strategy*. Penulisan nilai *payoff* di dalam *matrix payoff* akan ditulis dengan notasi (a,b) dimana a merupakan keuntungan untuk Pemain 1 dan b merupakan keuntungan untuk Pemain 2.

2.3.3 *Cooperative Games*

Cooperative Games adalah tipe permainan yang mengakomodasi kemungkinan semua pemain akan melakukan koordinasi atau kerja sama dalam menentukan strategi yang terbaik untuk kedua pihak. Strategi yang dihasilkan bisa saja tidak optimal karena berdasarkan kesepakatan yang dilakukan kedua pihak setelah bekerjasama dan berkooperasi.

2.3.4 Pencarian Solusi dari Permainan

Pencarian solusi dari permainan dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu *maximin-minimax*, dominasi strategi, metode grafis, dan *complementary slackness*.

1. Maximin-Minimax

Metode *maximin* dan *minimax* dilakukan dengan cara mencari nilai paling maksimum dari nilai-nilai paling minimal jika melakukan setiap strategi baris (mencari solusi agar tidak rugi banyak), serta mencari nilai paling minimum dari nilai-nilai paling maksimal jika melakukan setiap strategi kolom (mencari solusi agar tidak untung sedikit). Metode ini menerapkan sikap tenggang rasa dimana setiap pemain harus memikirkan kepentingan pemain lain dalam mengambil keputusan. Sebab jika pemain memilih strategi yang salah dengan tidak memikirkan pemain lain, maka pemain tersebut yang akan merugi sendiri dalam jumlah yang banyak.

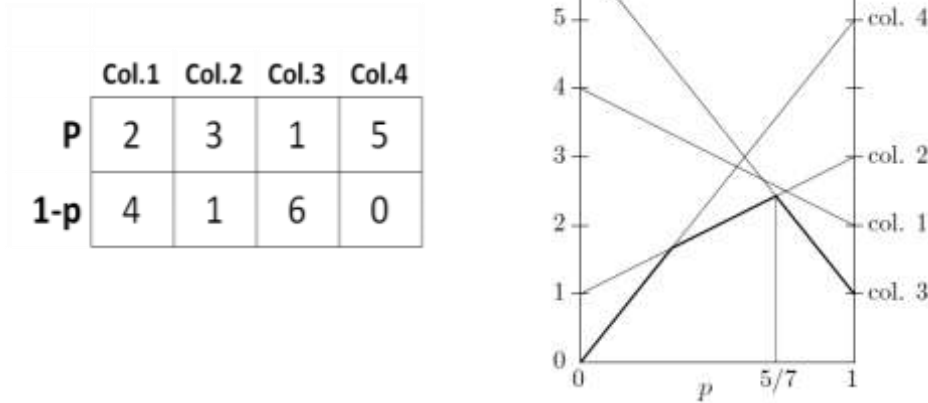
2. Dominasi Strategi

Langkah pertama yang biasanya digunakan untuk menemukan strategi yang optimal yaitu dengan strategi didominasi. Caranya, menghilangkan beberapa strategi dalam *matrix payoff* dengan menghapus strategies yang jika digunakan selalu kalah atau terdominasi dibanding jika memilih strategi lain. Dengan menghilangkan melalui duplikasi apa yang kita benar-benar lakukan adalah menghapus setiap strategi yang identik dalam *matrix payoff*. Eliminasi oleh dominasi adalah ketika kita menggunakan menghilangkan strategi yang menyediakan nilai *payoff* lebih rendah atau lebih lemah.

3. Metode Grafis

Metode pencarian solusi lainnya dari *game theory* adalah dengan metode grafis. Metode grafis digunakan hanya ketika ada salah satu pemain yang memiliki hanya 2 strategi pilihan. Probabilitas dari suatu strategi diwakili dengan p dan yang lainnya adalah $1-p$. Kemudian, dibuat grafik fungsi linear dari permainan *matrix*. Metode grafis untuk memecahkan masalah pemrograman matematika didasarkan pada mendefinisikan set langkah-langkah logis. Mengikuti prosedur yang sistematis ini, masalah pemrograman yang diberikan dapat dengan mudah dipecahkan dengan jumlah komputasi yang minimum. Seperti kita akan melihat

bahwa dari karakteristik kurva kita dapat mencapai informasi lebih lanjut. Berikut ini merupakan contoh penyelesaian dengan metode grafis.



Gambar 2. 6 Contoh Penyelesaian Menggunakan Metode Grafis (Widodo, 2013)

4. *Complementary Slackness*

Game yang tidak memiliki *saddle point* dan strategi yang mendominasi dapat diselesaikan dengan metode *complementary slackness*. Metode ini hanya digunakan untuk permainan 2 pemain dengan masing-masing 2 strategi. Sebelum melakukan metode ini, terlebih dahulu membuat *reward matrix* dari *matrix payoff*. Berikut perumusan metode *complementary slackness* menurut Widodo (2014).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

$$X_1^* = \frac{a_{22} - a_{21}}{a_{22} + a_{11} - a_{12} - a_{21}}$$

$$X_2^* = \frac{a_{11} - a_{12}}{a_{22} + a_{11} - a_{12} - a_{21}}$$

$$V^* = \frac{a_{11} \times a_{22} - a_{12} \times a_{21}}{a_{22} + a_{11} - a_{12} - a_{21}}$$

2.4 *Literature Review*

Selain landasan teori yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, penelitian ini juga didasari oleh penelitian-penelitian sebelumnya yang diambil dari beberapa jurnal ilmiah dan tugas akhir. Penelitian-penelitian sebelumnya meliputi penelitian mengenai *economic dispatch* dengan metode dan objektif yang berbeda-

beda. Berikut adalah beberapa *critical review* yang berhubungan dengan penelitian ini.

Tabel 2.2 *Literature Review* Penelitian

No	Penelitian	Metode	Objektif
1	(Farag et al., 1995) <i>Economic dispatch Multiobjective Optimization Procedures Using Linear Programming Techniques</i>	<i>Linear Programming</i>	Minimasi biaya pembangkitan listrik dan minimasi emisi yang dihasilkan
2	(Kumar et al., 2010) <i>A hybrid multi-agent based particle swarm optimization algorithm for economic power dispatch</i>	<i>Particle Swarm Optimization</i>	Minimasi biaya pembangkitan listrik dengan pertimbangan <i>valve point effect</i>
3	(Pandi et al., 2011) <i>Dynamic economic dispatch using hybrid swarm intelligence based harmony search algorithm</i>	<i>Harmony search algorithm</i>	Minimasi biaya pembangkitan listrik secara dinamis menurut waktu
4	(Amruddin, 2011) Aplikasi <i>Micro Genetic Algorithm</i> untuk Penyelesaian <i>Economic Dispatch</i> Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV	<i>Micro Genetic Algorithm</i>	Minimasi biaya pembangkitan listrik
5	(Kumar et al., 2012) <i>A novel multi-objective directed bee colony optimization algorithm for multi objective emission constrained economic power dispatch</i>	<i>Directed Bee Colony Optimization</i>	Minimasi biaya pembangkitan listrik dan minimasi emisi yang dihasilkan
6	(Anesya, 2012) Optimisasi <i>Economic Dispatch</i> pada Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV menggunakan <i>Differential Algorithm</i>	<i>Differential Algorithm</i>	Minimasi biaya pembangkitan listrik
7	(Rahman, 2012) Optimisasi Pembebanan Pembangkit (<i>Economic Dispatch</i>) pada Sistem 500 kV Jawa Bali Menggunakan <i>Particle Swarm Optimization</i> dengan Pertimbangan Kapasitas Transmisi	<i>Particle Swarm Optimization</i>	Minimasi biaya pembangkitan listrik dengan mempertimbangkan kapasitas transmisi
8	(Mahatma, 2013) Implementasi Algoritma <i>Ant Colony Optimization</i> untuk Menyelesaikan Permasalahan <i>Dynamic Economic Dispatch</i> dengan Memperhatikan Rugi-rugi Daya Transmisi dan <i>Valve Effect</i>	<i>Ant Colony Optimization</i>	Minimasi biaya pembangkitan listrik dengan rugi-rugi daya transmisi dan <i>valve effect</i>

Tabel 2.2 *Literature Review* Penelitian

No	Penelitian	Metode	Objektif
9	(Wardana, 2014) Implementasi Algoritma <i>Particle Swarm Optimization</i> untuk Menyelesaikan Permasalahan <i>Dynamic Economic Dispatch</i> Memperhatikan <i>Ramp Rate</i>	<i>Particle Swarm Optimization</i>	Minimasi biaya pembangkitan listrik dengan mempertimbangkan <i>ramp rate</i>
10	(Singh et al., 2015) <i>Multiobjective Economic dispatch Problem Solved by New PSO</i>	<i>Particle Swarm Optimization</i>	Minimasi biaya pembangkitan listrik dan minimasi emisi NO_x
11	(Aji, 2016) Optimasi <i>Economic dispatch</i> Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500kV dengan Algoritma <i>Ions Motion Optimization</i>	<i>Ions Motion Optimization</i>	Minimasi biaya pembangkitan listrik dan minimasi emisi CO_2
12	(Melati, 2017) Analisis Strategi <i>Economic Dispatch</i> dengan Pendekatan <i>Game Theory</i> pada Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV	<i>Game Theory</i>	Minimasi biaya pembangkitan dengan mempertimbangkan kepentingan dari pembangkit gas dan pembangkit batu bara

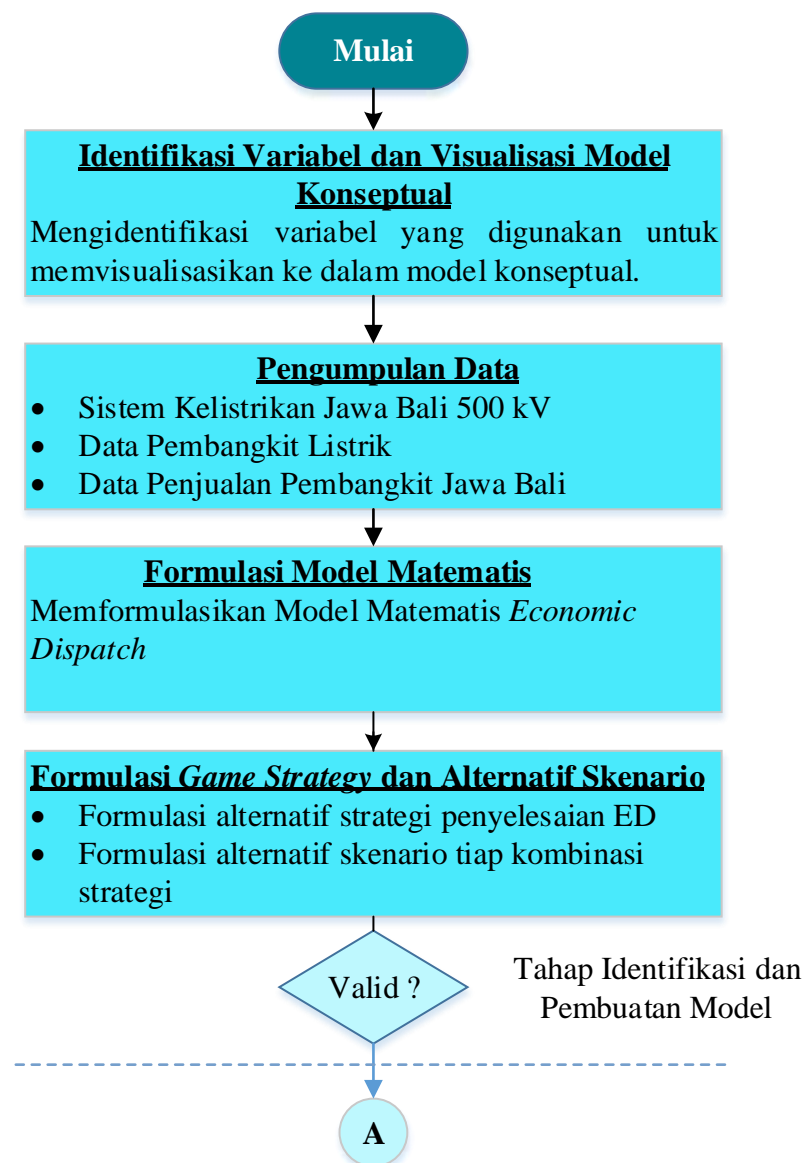
Dari *literature review* pada Tabel 2.2 dapat dilihat bahwa penelitian-penelitian mengenai *economic dispatch* dahulu diselesaikan dengan pendekatan *linear programming* dan algoritma metaheuristik. Namun seiring berjalannya waktu, metode optimasi dapat dikombinasikan untuk penyelesaian *economic dispatch* dengan memperhatikan kepentingan banyak pihak yaitu pembangkit gas dan pembangkit batu bara pada sistem kelistrikan Jawa Bali, sehingga pada penelitian ini digunakan metode dengan pendekatan teori permainan untuk mengatur jumlah daya yang dibangkitkan setiap pembangkit dengan biaya yang minimum.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

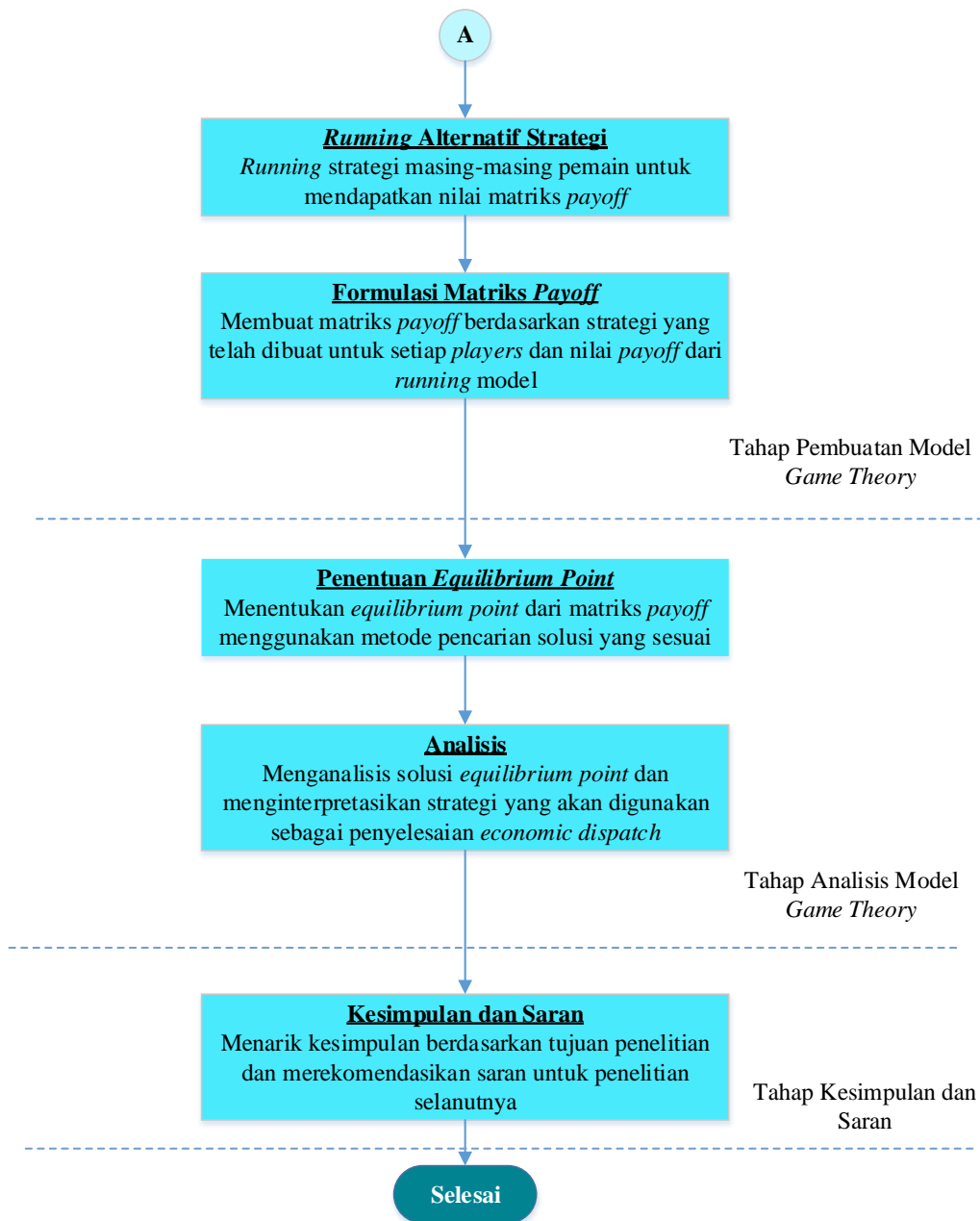
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Pada metodologi penelitian dijelaskan mengenai tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian aplikasi teori permainan untuk menyelesaikan permasalahan *economic dispatch*.. Berikut merupakan *flowchart* dari penelitian yang dilakukan.



Gambar 3. 1 *Flowchart* Metodologi Penelitian



Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penelitian (lanjutan)

3.1 Tahap Identifikasi dan Pembuatan Model

Terdapat lima langkah pada tahap identifikasi dan pembuatan model diantaranya,

3.1.1 Identifikasi Variabel dan Visualisasi Model Konseptual

Pengidentifikasian variabel digunakan untuk membangun sistem yang sesuai dengan kondisi eksisting. Variabel yang diidentifikasi harus sesuai dengan kondisi riil dan mempertimbangkan batasan yang telah dibuat dalam penelitian ini. Proses identifikasi variabel ini dilakukan dengan metode wawancara dengan pihak PT Pembangkitan Jawa Bali dan *study literature* yang terkait dengan *economic dispatch*. Beberapa variabel yang diidentifikasi dalam sistem ini akan berperan sebagai *decision maker* yaitu pembangkit berbahan bakar gas dan pembangkit berbahan bakar batu bara.

Selanjutnya merancang model konseptual dapat membantu dalam penataan masalah, mengidentifikasi faktor-faktor relevan, dan memberikan koneksi yang memudahkan dalam pemetaan permasalahan sistem. Model konseptual dalam penelitian ini divisualisasikan untuk memberikan gambaran suatu pendekatan proses mengenai sistem *economic dispatch* pada sistem kelistrikan Jawa Bali.

3.1.2 Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data yang diperoleh dari PT Pembangkitan Jawa Bali berupa data/informasi kelistrikan Jawa Bali 500 kV, data pembangkit listrik, dan data penjualan pembangkit Jawa Bali.

3.1.3 Formulasi Model Matematis

Dalam penelitian tugas akhir mengenai *economic dispatch* ini, model matematis terdiri dari fungsi tujuan yaitu minimasi biaya pembangkitan beserta fungsi pembatas kesetimbangan daya dan kapasitas pembangkit. Berikut ini adalah model matematis dari kasus *economic dispatch* yang akan digunakan dalam tugas akhir ini.

$$F_T = \text{MIN} \sum_{i=1}^N (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (3.1)$$

Subject to :

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D \quad (3.2)$$

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max} \quad (3.3)$$

Fungsi tujuan dari permasalahan ini adalah minimasi biaya pembangkitan dari setiap pembangkit untuk menghasilkan output yang ditunjukkan oleh persamaan (3.1). Konstrain atau fungsi pembatas (3.2) merupakan fungsi pembatas kesetimbangan daya yang mengharuskan daya yang dikeluarkan oleh pembangkit (P_i) besarnya harus sama dengan daya yang dibutuhkan oleh konsumen (P_D) karena mengabaikan *losses* yang terjadi saat proses transmisi listrik. Konstrain atau fungsi pembatas (3.3) merupakan fungsi pembatas kapasitas pembangkit yang mengharuskan jumlah daya yang dikeluarkan oleh pembangkit tidak boleh melebihi kapasitas maksimal dan tidak boleh kurang dari kapasitas minimum pembangkit.

3.1.4 *Formulasi Game Strategy dan Alternatif Skenario*

Untuk dapat mengembangkan model yang telah dibuat, pemain harus mempunyai beberapa alternatif strategi berupa *strategic form* atau *extensive form* yang dapat diimplementasikan dalam permasalahan *economis dispatch*. Dari kombinasi strategi yang ada, selanjutnya dibuat alternatif skenario untuk setiap kombinasi strategi dari masing-masing pemain.

3.1.5 *Verifikasi dan Validasi*

Pada tahap ini dilakukan verifikasi dan validasi terhadap model yang telah dibangun. Tahap ini dilakukan untuk memastikan model tersebut sudah sesuai dengan kondisi sebenarnya. Verifikasi adalah tahapan untuk mengetahui model yang dibangun telah tepat secara logis dan matematis, sedangkan validasi merupakan tahapan untuk melihat apakah model yang telah dibuat mampu merepresentasikan permasalahan yang diteliti.

3.2 Tahap Pembuatan Model *Game Theory*

Pada tahap ini, dilakukan pembuatan model *game theory* yang terdiri dari dua langkah berikut.

3.2.1 *Running Alternatif Skenario*

Alternatif skenario yang telah dirancang kemudian diimplementasikan kedalam model satu demi satu. Setelah itu dilakukan *running* skenario dan didapatkan hasil dari nilai *payoff*.

3.2.2 *Formulasi Matrik Payoff*

Matrik *payoff* dapat dibuat setelah nilai *payoff* diperoleh dari hasil *running* model. Matrik *payoff* yang diperoleh merepresentasikan hasil dari keseluruhan skenario yang ada dengan suatu nilai.

3.3 Tahap Analisis Model *Game Theory*

Setelah dibuat matrik *payoff*, *game theory* diaplikasikan dengan tujuan mencari nilai *equilibrium* atau solusi optimal dengan berbagai metode penyelesaian yang telah ditulis pada tinjauan pustaka untuk menganalisis hasil interaksi strategi dari beberapa *decision maker*. Analisis yang dilakukan meliputi tipe *equilibrium point* yang didapat dan dampak dari *equilibrium point* terhadap *value of the game*.

3.4 Tahap Kesimpulan dan Saran

Tahapan terakhir adalah penarikan kesimpulan dimana tahap ini merupakan jawaban dari tujuan penelitian. Kesimpulan juga berdasarkan hasil analisis yang sudah dilakukan. Selanjutnya diberikan rekomendasi yang diharapkan mengenai pengembangan dari penelitian ini untuk penelitian selanjutnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

PEMBUATAN MODEL

Pada Bab Pembuatan Model dijelaskan mengenai tahapan pembuatan model *economic dispatch* (ED) pada sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV dan strukturisasi metode *game theory* yang digunakan untuk menyelesaikan masalah *economic dispatch* (ED).

4.1 Formulasi Model Konseptual

Dalam merancang model konseptual, variabel yang diidentifikasi dalam sistem ini akan berperan sebagai *decision maker* yaitu pembangkit berbahan bakar gas dan pembangkit berbahan bakar batu bara. Daya yang akan dibangkitkan oleh setiap pembangkit didefinisikan sebagai variabel keputusan dimana nilainya berada di bawah kontrol pemegang keputusan. Nantinya setiap *decision maker* memiliki strategi-strategi yang tujuan utamanya adalah untuk meminimumkan biaya operasional pembangkitan.

Selanjutnya perancangan model konseptual dapat membantu dalam penataan masalah, mengidentifikasi faktor-faktor relevan, dan memberikan koneksi yang memudahkan dalam pemetaan permasalahan sistem. Model konseptual dalam penelitian ini divisualisasikan untuk memberikan gambaran suatu pendekatan proses mengenai sistem *economic dispatch* pada sistem kelistrikan Jawa Bali.

Permasalahan *economic dispatch* dalam sistem kelistrikan Jawa Bali dipengaruhi oleh banyaknya unit pembangkitan dimana masing-masing unit pembangkitan memiliki kapasitas dan karakteristik yang berbeda. Unit-unit pembangkit yang berperan sebagai *decision maker* tersebut saling terinterkoneksi dalam memenuhi kebutuhan permintaan daya. Setiap *decision maker* memiliki strategi dimana kombinasi dari masing-masing strategi akan menghasilkan total biaya untuk setiap *decision maker*. Sehingga alokasi pembebanan daya yang dibangkitkan oleh tiap pembangkit harus direncanakan secara kooperatif dengan mempertimbangkan kepentingan dari pihak masing-masing unit. Hal tersebut akan lebih menguntungkan semua pihak dan dapat diperoleh nilai yang setimbang dalam

mencapai tujuan berupa minimasi biaya pembangkitan. Berikut merupakan model konseptual dari permasalahan *economic dispatch* pada sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV.



Gambar 4. 1 Model Konseptual *Economic Dispatch* Sistem Kelistrikan Jawa Bali

4.2 Pengumpulan Data

Sebelum pembuatan model *economic dispatch*, terlebih dahulu dilakukan pengumpulan data yang diperoleh dari PT Pembangkitan Jawa Bali berupa data kelistrikan Jawa Bali 500 kV, data pembangkit listrik, dan data penjualan pembangkit Jawa Bali. Berdasarkan *single line base diagram* pada gambar 2.4, berikut merupakan daftar blok-blok pembangkit sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV beserta kapasitas daya yang dapat dibangkitkan setiap pembangkit.

Tabel 4. 1 Daftar Blok dan Kapasitas Daya Pembangkit 500 kV dalam MW

P _i	Jenis Pembangkit	GITET	Blok	P _{min}	P _{max}
1	Batu bara	Suralaya	Suralaya 1-4	800	1486
2			Suralaya 5-7	903	1726
3		New Suralaya	New Suralaya	301	590
4		Tanjung Jati	Tanjung Jati 1-2	824	1320
5			Tanjung Jati 3-4	796	1320
6		Paiton	Paiton 1-2	450	740
7			Paiton 3	408	815
8			Paiton 5-6	610	1220
9			Paiton 7-8	604	1230
10			Paiton 9	301	615
11	Gas	Gresik	Gresik	190	450

Tabel 4. 1 Daftar Blok dan Kapasitas Daya Pembangkit 500 kV dalam MW

P _i	Jenis Pembangkit	GITET	Blok	P _{min}	P _{max}
12		Grati	Grati	295	453,75
13		Muara Tawar	Muara Tawar 1	360	609
14			Muara Tawar 2	160	270
15			Muara Tawar 3	240	420
16			Muara Tawar 4	240	420
17			Muara Tawar 5	140	212
18	Air	Cirata	Cirata	0	1120
19		Saguling	Saguling	0	1040

Sumber: PT PJB, 2016

Selain data blok dan kapasitas daya pembangkit, data yang dibutuhkan selanjutnya adalah data penjualan pembangkit Jawa Bali. Data penjualan yang dimaksud merupakan data pembebanan pada sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV yang diforecast menggunakan *software* jROS dengan pembagian sesuai wilayah regionnya. Berikut merupakan rekap beban per subsistem 500 kV pada tanggal 5 Januari 2016.

Tabel 4. 2 Beban Per Subsistem 500 kV

5 Januari 2016 12.00									
Suralaya	210	Tasikmalaya	135	Pedan	239	Kediri	606		
Kembangan	579	Cibatu	294	Tanjung Jati	342	Krian	697		
Cilegon	367	Mandirancan	479	Ungaran	364	Gresik	453		
Gandul	612	Cirata	526	Total Area 3	946	Ngimbang	192		
Balaraja	406	Bandung S	378			Grati	318		
Cibinong	290, 97	Total Area 2	1812			Paiton	1018		
Cawang	524					Total Area4	3284		
Bekasi	764								
Depok	381								
Total Area 1	4134								
TOTAL BEBAN				10.176 MW					

4.3 Model *Economic Load Dispatch* Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV

Model matematika dari permasalahan *economic dispatch* pada penelitian tugas akhir ini dibuat berdasarkan referensi model yang telah dibuat dan diterapkan

oleh Farag (1995). Notasi yang digunakan dalam persamaan *economic dispatch* diantaranya sebagai berikut.

n	= jumlah pembangkit
a_i	= koefisien persamaan biaya pembangkit i (Rp/MW ² h)
b_i	= koefisien persamaan biaya pembangkit i (Rp/MWh)
c_i	= koefisien persamaan biaya pembangkit i (Rp/h)
P_i^{min}	= kapasitas daya minimum pembangkit i (MW)
P_i^{max}	= kapasitas daya maksimum pembangkit i (MW)
P_D	= total <i>demand</i> sistem
P_i	= daya yang dibangkitkan pembangkit i

Variabel keputusan yang menguraikan secara lengkap keputusan yang akan dibuat dalam tugas akhir ini adalah P_i (daya yang dibangkitkan pembangkit i).

Tujuan utama dari *economic dispatch* adalah minimasi biaya pembangkitan. Secara umum fungsi biaya dari tiap pembangkit dapat diformulasikan secara matematis sebagai suatu fungsi polinomial orde dua sebagai berikut.

$$MIN Z_1 = F_T = \sum_{i=1}^N (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i)$$

Untuk mendapatkan parameter a_i , b_i , c_i dilakukan regresi non linear karakteristik *output* (berupa biaya bahan bakar) sebagai variabel dependen dan *input* (berupa daya *output* yang ingin dihasilkan) sebagai variabel independen untuk pembangkit termal. Sedangkan untuk pembangkit hidro dilakukan dengan *trend analysis*. Elemen biaya yang digunakan dalam tugas akhir ini hanya komponen C atau biaya bahan bakar.

Penentuan fungsi biaya dengan regresi non liner dan *trend analysis* dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa parameter diantaranya jenis bahan bakar, kapasitas minimum, kapasitas maksimum, biaya *setup*, dan biaya *input* (biaya bahan bakar). Berikut merupakan fungsi biaya pembangkitan sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV.

Tabel 4. 3 Fungsi Biaya Pembangkitan Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV

P _i	BLOK	a _i	b _i	c _i	Fungsi Biaya
1	Suralaya 1-4	-0,000004	395,01	139998	$-0,000004(P_1)^2 + 395,01(P_1) + 139998$
2	Suralaya 5-7	0,000002	390	200005	$0,000002(P_2)^2 + 390(P_2) + 200005$
3	New Suralaya	-0,00002	360,02	199998	$-0,00002(P_3)^2 + 360,02(P_3) + 199998$
4	Tanjung Jati 1-2	0,00001	339,97	200015	$0,00001(P_4)^2 + 339,97(P_4) + 200015$
5	Tanjung Jati 3-4	-0,00003	310,06	199975	$-0,00003(P_5)^2 + 310,06(P_5) + 199975$
6	Paiton 1-2	0,0001	389,88	160031	$0,0001(P_6)^2 + 389,88(P_6) + 160031$
7	Paiton 3	0,000006	334,99	220006	$0,000006(P_7)^2 + 334,99(P_7) + 220006$
8	Paiton 5-6	-0,00001	340,02	199995	$-0,00001(P_8)^2 + 340,02(P_8) + 199995$
9	Paiton 7-8	-0,000002	345	199999	$-0,000002(P_9)^2 + 345(P_9) + 199999$
10	Paiton 9	-0,00005	320,04	199987	$-0,00005(P_{10})^2 + 320,04(P_{10}) + 199987$
11	Gresik	-0,000007	550,01	12001	$-0,000007(P_{11})^2 + 550,01(P_{11}) + 12001$
12	Grati	0,000009	675	25003	$0,000009(P_{12})^2 + 675(P_{12}) + 25003$
13	Muara Tawar 1	0,000009	959,99	24003	$0,000009(P_{13})^2 + 959,99(P_{13}) + 24003$
14	Muara Tawar 2	0,00002	2930	9002,7	$0,00002(P_{14})^2 + 2930(P_{14}) + 9002,7$
15	Muara Tawar 3	0,00002	2420	9003,1	$0,00002(P_{15})^2 + 2420(P_{15}) + 9003,1$
16	Muara Tawar 4	-0,00002	2300	9003,2	$-0,00002(P_{16})^2 + 2300(P_{16}) + 9003,2$
17	Muara Tawar 5	0,0001	949,97	60003	$0,0001(P_{17})^2 + 949,97(P_{17}) + 60003$
18	Cirata	0	10	0	$10(P_{18})$
19	Saguling	0	8	0	$8(P_{19})$

Pengoperasian ekonomis pembangkit tenaga listrik harus memenuhi batasan-batasan atau *constraints* tertentu. Dua *constraints* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *equality constraints* dan *inequality constraints*.

Batasan 1 : Keseimbangan Daya

Equality constraint merupakan batasan keseimbangan daya yang mengharuskan total daya yang dibangkitkan oleh masing-masing pembangkit harus sama dengan jumlah total kebutuhan beban dimana dalam tugas akhir ini diasumsikan tidak terjadi *losses* saat proses transmisi. Sehingga dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D$$

Parameter *demand* didapatkan dari *forecast* kebutuhan daya sesaat sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV pada 5 Januari 2016 pukul 12.00.

Batasan 2 : Kapasitas Pembangkit

Inequality constraint merupakan batasan kapasitas pembangkit yang mengharuskan daya *output* dari tiap unit lebih besar dari atau sama dengan daya minimum yang diperbolehkan serta lebih kecil dari atau sama dengan daya maksimum yang diperbolehkan. Berikut adalah formulasi matematis dari batasan kapasitas tiap pembangkit.

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max}$$

4.4 Pengaplikasian *Game Theory* pada *Economic Dispatch*

Pada tugas akhir ini, *economic dispatch* diselesaikan dengan menggunakan pendekatan *game theory*. Pada dasarnya, *game theory* merupakan suatu metode pengambilan keputusan dengan melibatkan lebih dari satu *decision maker* yang memiliki pilihan strategi untuk mencapai keputusan.

4.4.1 *Formulasi Komponen Game Theory*

Di dalam *game theory* terdapat komponen-komponen permainan yang perlu diidentifikasi. Komponen-komponen *game theory* pada tugas akhir ini diantaranya adalah.

1. *Games* : *Cooperative Two-Person Non-Zero Sum Game*
2. *Players*: *Player 1* adalah pembangkit gas dan *player 2* adalah pembangkit batu bara
3. Strategi: alternatif keputusan yang akan diambil oleh setiap pemain

Tabel 4. 4 Alternatif Strategi dari Setiap Pemain

No	Strategi	Pembangkit Gas
S1.1	GROUP	Menentukan daya yang harus dibangkitkan pembangkit gas dengan menyamaratakan daya pembangkit gas yang dikelompokkan berdasarkan GITET yang sama
S1.2	TOP	Menentukan daya yang harus dibangkitkan sesuai dengan sistem <i>Take or Pay</i> (TOP) pembangkit gas
S1.3	PULL	Menentukan daya yang harus dibangkitkan pembangkit gas sesuai dengan <i>demand</i> yang dibutuhkan
No	Strategi	Pembangkit Batu Bara
S2.1	GROUP	Menentukan daya yang harus dibangkitkan pembangkit batu bara dengan menyamaratakan daya pembangkit batu bara yang dikelompokkan berdasarkan GITET yang sama
S2.2	PULL	Menentukan daya yang harus dibangkitkan pembangkit batu bara sesuai dengan <i>demand</i> yang dibutuhkan

Pada penerapan strategi **GROUP** dimana setiap pembangkit baik pembangkit gas maupun pembangkit batu bara akan menentukan daya yang harus dibangkitkan dengan menyamaratakan daya sesuai dengan pengelompokan GITET. Untuk pengelompokan blok Suralaya 1-4 dan Suralaya 5-7 masuk ke dalam *Group* Suralaya, blok Tanjung Jati 1-2 dan Tanjung Jati 3-4 masuk ke dalam *Group* Tanjung Jati, blok Paiton 3 dan Paiton 7-8 masuk ke dalam *Group* Paiton PEC, blok Muara Tawar 2, 3, dan 4 masuk ke dalam *Group* Muara Tawar 2-4. Sehingga berikut ditampilkan rekap pengelompokan GITET untuk pembangkit gas dan pembangkit batu bara pada tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Rekap Pengelompokan GITET untuk Strategi GROUP

P _i	Jenis Pembangkit	GROUPING	Blok
1	Batu bara	Suralaya	Suralaya 1-4
2			Suralaya 5-7
3		New Suralaya	New Suralaya
4		Tanjung Jati	Tanjung Jati 1-2
5			Tanjung Jati 3-4
6		Paiton PJB	Paiton 1-2
7		Paiton PEC	Paiton 3
8		Paiton JP	Paiton 5-6
9		Paiton PEC	Paiton 7-8
10		Paiton PLN	Paiton 9
11	Gas	Gresik	Gresik
12		Grati	Grati
13		Muara Tawar 1	Muara Tawar 1
14		Muara Tawar 2-4	Muara Tawar 2
15			Muara Tawar 3
16			Muara Tawar 4
17		Muara Tawar 5	Muara Tawar 5
18	Air	Cirata	Cirata
19		Saguling	Saguling

Berdasarkan alternatif strategi yang telah dirancang, selanjutnya dibuat alternatif skenario untuk setiap kombinasi strategi dari masing-masing pemain. Setiap satu kombinasi strategi yang dipilih oleh masing-masing pemain disebut sebagai suatu skenario. Skenario ini nantinya akan dirumuskan menjadi model *economic dispatch* yang telah disesuaikan. Jumlah skenario didalam *game* ini sebanyak 6 skenario yang diformulasikan seperti pada Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4. 6 Alternatif Skenario dari Setiap Kombinasi Strategi

		Pembangkit Batu Bara	
		S2.1	S2.2
Pembangkit Gas	S1.1	Skenario 1	Skenario 2
	S1.2	Skenario 3	Skenario 4
	S1.3	Skenario 5	Skenario 6

Tabel 4.6 menunjukkan bahwa setiap skenario mewakili satu alternatif keputusan dari setiap pemain. Misalnya skenario 1 adalah kombinasi dari strategi S1.1 dan S2.1. Untuk lebih jelasnya, kombinasi strategi antar pemain dapat dilihat pada tabel 4.7 berikut.

Tabel 4. 7 Keterangan Skenario Pengambilan Keputusan

Skenario	Pembangkit Gas	Pembangkit Batu Bara
1	Menyamarkan daya pembangkit gas sesuai pengelompokan GITET	Menyamarkan daya pembangkit batu bara sesuai pengelompokan GITET
2	Menyamarkan daya pembangkit gas sesuai pengelompokan GITET	Menyesuaikan dengan <i>demand</i> yang dibutuhkan
3	Menyesuaikan dengan sistem TOP	Menyamarkan daya pembangkit batu bara sesuai pengelompokan GITET
4	Menyesuaikan dengan sistem TOP	Menyesuaikan dengan <i>demand</i> yang dibutuhkan
5	Menyesuaikan dengan <i>demand</i> yang dibutuhkan	Menyamarkan daya pembangkit batu bara sesuai pengelompokan GITET
6	Menyesuaikan dengan <i>demand</i> yang dibutuhkan	Menyesuaikan dengan <i>demand</i> yang dibutuhkan

4.4.2 Formulasi Skenario ke dalam Model Economic Dispatch

Setelah diketahui alternatif skenario dari setiap kombinasi strategi yang telah dirancang, selanjutnya adalah memodelkan skenario-skenario tersebut ke dalam model *economic dispatch*.

4.4.2.1 Model Matematis Skenario 1

Skenario 1 merupakan kombinasi strategi dimana pembangkit gas menerapkan strategi GROUP yaitu menyamaratakan daya pembangkit gas sesuai pengelompokan GITET dan pembangkit batu bara menerapkan strategi GROUP yaitu menyamaratakan daya pembangkit batu bara sesuai pengelompokan GITET. Berikut merupakan formulasi model matematis skenario 1.

$$F_T = \text{Min} \sum_{i=1}^n a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i$$

Subject to:

$$P_{\min_i} \leq P_i \leq P_{\max_i}$$

$$\sum_{i=1}^n P_i \geq P_D$$

$$P_j = P_k, \forall_j = \text{group batu bara}, \forall_k = \text{group batu bara sekawan}$$

$$P_l = P_m, \forall_l = \text{group gas}, \forall_m = \text{group gas sekawan}$$

4.4.2.2 Model Matematis Skenario 2

Skenario 2 merupakan kombinasi strategi dimana pembangkit gas menerapkan strategi GROUP yaitu menyamaratakan daya pembangkit gas sesuai pengelompokan GITET dan pembangkit batu bara menerapkan strategi PULL yaitu menyesuaikan dengan *demand* yang dibutuhkan. Berikut merupakan formulasi model matematis skenario 2.

$$F_T = \text{Min} \sum_{i=1}^n a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i$$

Subject to:

$$P_{\min_i} \leq P_i \leq P_{\max_i}$$

$$\sum_{i=1}^n P_i \geq P_D$$

$$P_l = P_m, \forall_l = \text{group gas}, \forall_m = \text{group gas sekawan}$$

4.4.2.3 Model Matematis Skenario 3

Skenario 3 merupakan kombinasi strategi dimana pembangkit gas menerapkan strategi TOP yaitu pembebanan sesuai sistem TOP dan pembangkit batu bara menerapkan strategi GROUP yaitu menyamaratakan daya pembangkit batu bara sesuai pengelompokan GITET. Berikut merupakan formulasi model matematis skenario 3.

$$F_T = \text{Min} \sum_{i=1}^{10} a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + \sum_{i=11}^{17} \text{Kontrak TOP}_i + \sum_{i=18}^{19} b_i P_i$$

Subject to:

$$P_{\min_i} \leq P_i \leq P_{\max_i}$$

$$\sum_{i=1}^n P_i \geq P_D$$

$$P_j = P_k, \forall_j = \text{group batu bara}, \forall_k = \text{group batu bara sekawan}$$

$$P_o = \text{TOP}_o, o = \text{pembangkit gas dengan daya } P_{\min}$$

Penentuan kontrak TOP diperoleh dari perkalian harga gas dalam Rp/kWH dengan daya yang dibangkitkan oleh pembangkit gas. Harga gas diperoleh berdasarkan parameter harga kontrak gas (\$/mmbtu), energi yang dihasilkan (MWH), SFC (*Specific Fuel Consumption*), dan kurs dollar.

4.4.2.4 Model Matematis Skenario 4

Skenario 4 merupakan kombinasi strategi dimana pembangkit gas menerapkan strategi TOP yaitu pembebanan sesuai sistem TOP dan pembangkit batu bara menerapkan strategi PULL yaitu menyesuaikan dengan *demand* yang dibutuhkan. Berikut merupakan formulasi model matematis skenario 4.

$$F_T = \text{Min} \sum_{i=1}^{10} a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + \sum_{i=11}^{17} \text{Kontrak TOP}_i + \sum_{i=18}^{19} b_i P_i$$

Subject to:

$$P_{\min_i} \leq P_i \leq P_{\max_i}$$

$$\sum_{i=1}^n P_i \geq P_D$$

$$P_o = \text{TOP}_o, o = \text{pembangkit gas dengan daya } P_{\min}$$

4.4.2.5 Model Matematis Skenario 5

Skenario 5 merupakan kombinasi strategi dimana pembangkit gas menerapkan strategi PULL yaitu menyesuaikan dengan *demand* yang dibutuhkan

dan pembangkit batu bara menerapkan strategi GROUP yaitu menyamaratakan daya pembangkit batu bara sesuai pengelompokan GITET. Berikut merupakan formulasi model matematis skenario 5.

$$F_T = \text{Min} \sum_{i=1}^n a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i$$

Subject to:

$$P_{\min_i} \leq P_i \leq P_{\max_i}$$

$$\sum_{i=1}^n P_i \geq P_D$$

$$P_j = P_k, \forall_j = \text{group batu bara}, \forall_k = \text{group batu bara sekawan}$$

4.4.2.6 Model Matematis Skenario 6

Skenario 6 merupakan kombinasi strategi dimana pembangkit gas menerapkan strategi PULL yaitu menyesuaikan dengan *demand* yang dibutuhkan dan pembangkit batu bara menerapkan strategi PULL yaitu menyesuaikan dengan *demand* yang dibutuhkan. Berikut merupakan formulasi model matematis skenario 6.

$$F_T = \text{Min} \sum_{i=1}^n a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i$$

Subject to:

$$P_{\min_i} \leq P_i \leq P_{\max_i}$$

$$\sum_{i=1}^n P_i \geq P_D$$

4.5 Verifikasi dan Validasi

Verifikasi adalah tahapan untuk mengetahui model yang dibangun telah tepat secara logis dan matematis, sedangkan validasi merupakan tahapan untuk melihat apakah model yang telah dibuat mampu merepresentasikan permasalahan yang diteliti.

Verifikasi pada model ini dilakukan dengan 2 cara yaitu memeriksa variabel dan memeriksa persamaan yang telah diformulasikan sebelumnya. Pertama dilakukan pemeriksaan terhadap variabel-variabel yang ada di dalam model. Telah diperiksa bahwa variabel-variabel yang ada dalam model sudah sesuai dengan konsep. Seluruh variabel pada konsep sudah dimasukkan saat melakukan formulasi model. Kedua dilakukan pemeriksaan terhadap persamaan yang telah diformulasikan. Pemeriksaan ini dilakukan untuk memastikan tidak ada *syntax error* dalam persamaan. Selain itu, pemeriksaan ini dilakukan untuk memastikan hubungan persamaan antar variabel sudah sesuai dengan konsep yang dibuat. Kedua proses tersebut dilakukan untuk menjamin bahwa formulasi model yang telah dibangun sudah sesuai dengan konsep.

Setelah melakukan verifikasi, dilakukan validasi model dengan menguji apakah solusi yang dihasilkan pada model matematis sama dengan sistem eksisting. Validasi dilakukan dengan membandingkan solusi dari SOLVER dengan data sesungguhnya sehingga model yang telah dikembangkan dan diformulasikan dapat dikatakan layak. Berdasarkan model yang telah dirancang, keenam model tersebut memiliki karakteristik yang hamper sama, sehingga uji validasi dilakukan pada salah satu model yaitu model keenam. Model keenam adalah model dimana pembangkit gas dan pembangkit batu bara sama-sama menerapkan strategi PULL yaitu penentuan daya yang harus dibangkitkan berdasarkan permintaan yang dibutuhkan.

Validasi dilakukan dengan mencari eror daya yang dibangkitkan dari hasil jROS dan hasil model. Kemudian dicari nilai MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) untuk mengetahui rata-rata persentase kesalahan. Setelah diperoleh hasilnya, Tabel 4.8 menunjukkan bahwa solusi yang dihasilkan memiliki nilai MAPE sebesar 0,048086 sehingga tidak berpengaruh secara signifikan yang artinya model telah tervalidasi. Untuk logika hasil perhitungan model juga menunjukkan bahwa solusi yang dihasilkan tidak melanggar batasan-batasan yang ada.

Tabel 4. 8 Validasi Model

Blok	jROS (MW)	P _i (MW)	Error Absolut	MAPE
Suralaya 1-4	800	800	0	0
Suralaya 5-7	903	903	0	0
New Suralaya	301	301	0	0
Tanjung Jati 1-2	807	824	17	0,021066
Tanjung Jati 3-4	1188	1190	1,99995702	0,001683
Paiton 1-2	450	450	0	0
Paiton 3	408	408	0	0
Paiton 5-6	610	610	0	0
Paiton 7-8	604	604	0	0
Paiton 9	315	301	14	0,044444
Gresik	176	190	14	0,079545
Grati	315	295	20	0,063492
Muara Tawar 1	380	360	20	0,052632
Muara Tawar 2	180	160	20	0,111111
Muara Tawar 3	270	240	30	0,111111
Muara Tawar 4	270	240	30	0,111111
Muara Tawar 5	189	140	49	0,259259
Cirata	1100	1120	20	0,018182
Saguling	1000	1040	40	0,04
Total	10266	10176	Average	0,048086

4.6 Pembuatan Model *Game Theory*

Pada bagian ini akan dilakukan pembuatan model *game theory* yang terkait dengan permasalahan *economic dispatch*. Model ini yang nantinya akan di analisis untuk mendapatkan *equilibrium point*. Pembuatan model *game theory* terdiri dari dua bagian yaitu *running* alternatif skenario dan formulasi *matrix payoff*.

4.6.1 *Running Alternatif Skenario*

Berdasarkan alternatif skenario yang telah dirancang, masing-masing model matematis setiap skenario *dirunning* dengan *tool Solver* pada *software* Ms Excel. Tujuannya adalah untuk mengetahui daya yang dibangkitkan setiap pembangkit dan biaya pembangkitan yang dikeluarkan oleh masing-masing pemain pada setiap alternatif skenario. *Demand* yang harus dipenuhi adalah sebesar 10.176 MW berdasarkan *forecast* penjualan tanggal 5 Januari 2016 pukul 12.00. Hasil *running* alternatif skenario dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4. 9 *Running* Skenario 1 (GROUP-GROUP)

GROUPING	P _i	NAMA BLOK	JUMLAH UNIT	P _{min} /unit	P _{max} /unit	P / unit	IDR/Pembangkit
Suralaya	1	Suralaya 1-4	4	200	371,5	301	Rp 4.289.140.046,84
	2	Suralaya 5-7	3	301	575,33333	301	
New Suralaya	3	New Suralaya	1	301	590	301	
Tanjung Jati	4	Tanjung Jati 1-2	2	412	660	412	
	5	Tanjung Jati 3-4	2	398	660	412	
Paiton PJB	6	Paiton 1-2	2	225	370	225	
Paiton PEC	7	Paiton 3	1	408	815	408	
Paiton JP	8	Paiton 5-6	2	305	610	305	
Paiton PEC	9	Paiton 7-8	2	302	615	408	
Paiton PLN	10	Paiton 9	1	301	615	301	
Gresik	11	Gresik	4	47,5	112,5	47,5	Rp 2.531.842.269
Grati	12	Grati	4	73,75	113,4375	73,75	
Muara Tawar 1	13	Muara Tawar 1	4	90	152,25	90	
Muara Tawar 2-4	14	Muara Tawar 2	2	80	135	80	
	15	Muara Tawar 3	3	80	140	80	
	16	Muara Tawar 4	3	80	140	80	
Muara Tawar 5	17	Muara Tawar 5	2	70	106	70	Rp 17.020.000
Cirata	18	Cirata	8	0	140	108,75	
Saguling	19	Saguling	4	0	260	260	
				TOTAL	10.176 MW	Rp 6.838.002.317,97	

Tabel 4. 10 *Running* Skenario 2 (GROUP-PULL)

GROUPING	P _i	NAMA BLOK	JUMLAH UNIT	P _{min} /unit	P _{max} /unit	P / unit	IDR/Pembangkit
Suralaya	1	Suralaya 1-4	4	200	371,5	200	Rp 4.169.879.694,76
	2	Suralaya 5-7	3	301	575,33333	301	
New Suralaya	3	New Suralaya	1	301	590	301	
Tanjung Jati	4	Tanjung Jati 1-2	2	412	660	412	
	5	Tanjung Jati 3-4	2	398	660	595	
Paiton PJB	6	Paiton 1-2	2	225	370	225	
Paiton PEC	7	Paiton 3	1	408	815	408	
Paiton JP	8	Paiton 5-6	2	305	610	305	
Paiton PEC	9	Paiton 7-8	2	302	615	302	
Paiton PLN	10	Paiton 9	1	301	615	301	
Gresik	11	Gresik	4	47,5	112,5	47,5	Rp 2.531.842.269
Grati	12	Grati	4	73,75	113,4375	73,75	
Muara Tawar 1	13	Muara Tawar 1	4	90	152,25	90	
Muara Tawar 2-4	14	Muara Tawar 2	2	80	135	80	
	15	Muara Tawar 3	3	80	140	80	
	16	Muara Tawar 4	3	80	140	80	
Muara Tawar 5	17	Muara Tawar 5	2	70	106	70	Rp 19.520.000
Cirata	18	Cirata	8	0	140	140	
Saguling	19	Saguling	4	0	260	260	
					TOTAL	10.176 MW	Rp 6.721.241.963,69

Tabel 4. 11 *Running* Skenario 3 (TOP-GROUP)

GROUPING	P _i	NAMA BLOK	JUMLAH UNIT	P _{min} /unit	P _{max} /unit	P / unit	IDR/Pembangkit
Suralaya	1	Suralaya 1-4	4	200	371,5	301	Rp 4.289.140.046,84
	2	Suralaya 5-7	3	301	575,33333	301	
New Suralaya	3	New Suralaya	1	301	590	301	
Tanjung Jati	4	Tanjung Jati 1-2	2	412	660	412	
	5	Tanjung Jati 3-4	2	398	660	412	
Paiton PJB	6	Paiton 1-2	2	225	370	225	
Paiton PEC	7	Paiton 3	1	408	815	408	
Paiton JP	8	Paiton 5-6	2	305	610	305	
Paiton PEC	9	Paiton 7-8	2	302	615	408	
Paiton PLN	10	Paiton 9	1	301	615	301	
Gresik	11	Gresik	4	47,5	112,5	47,5	Rp 1.303.087.500
Grati	12	Grati	4	73,75	113,4375	73,75	
Muara Tawar 1	13	Muara Tawar 1	4	90	152,25	90	
Muara Tawar 2-4	14	Muara Tawar 2	2	80	135	80	
	15	Muara Tawar 3	3	80	140	80	
	16	Muara Tawar 4	3	80	140	80	
Muara Tawar 5	17	Muara Tawar 5	2	70	106	70	Rp 17.020.000
Cirata	18	Cirata	8	0	140	108,75	
Saguling	19	Saguling	4	0	260	260	
				TOTAL	10.176 MW	Rp 5.609.247.546,81	

Tabel 4. 12 *Running* Skenario 4 (TOP-PULL)

GROUPING	P _i	NAMA BLOK	JUMLAH UNIT	P _{min} /unit	P _{max} /unit	P / unit	IDR/Pembangkit
Suralaya	1	Suralaya 1-4	4	200	371,5	200	Rp 4.169.879.694,76
	2	Suralaya 5-7	3	301	575,33333	301	
New Suralaya	3	New Suralaya	1	301	590	301	
Tanjung Jati	4	Tanjung Jati 1-2	2	412	660	412	
	5	Tanjung Jati 3-4	2	398	660	595	
Paiton PJB	6	Paiton 1-2	2	225	370	225	
Paiton PEC	7	Paiton 3	1	408	815	408	
Paiton JP	8	Paiton 5-6	2	305	610	305	
Paiton PEC	9	Paiton 7-8	2	302	615	302	
Paiton PLN	10	Paiton 9	1	301	615	301	
Gresik	11	Gresik	4	47,5	112,5	47,5	Rp 1.303.087.500
Grati	12	Grati	4	73,75	113,4375	73,75	
Muara Tawar 1	13	Muara Tawar 1	4	90	152,25	90	
Muara Tawar 2-4	14	Muara Tawar 2	2	80	135	80	
	15	Muara Tawar 3	3	80	140	80	
	16	Muara Tawar 4	3	80	140	80	
Muara Tawar 5	17	Muara Tawar 5	2	70	106	70	Rp 19.520.000
Cirata	18	Cirata	8	0	140	140	
Saguling	19	Saguling	4	0	260	260	
					TOTAL	10.176 MW	Rp 5.492.487.194,76

Tabel 4. 13 *Running* Skenario 5 (PULL-GROUP)

GROUPING	P _i	NAMA BLOK	JUMLAH UNIT	P _{min} /unit	P _{max} /unit	P / unit	IDR/Pembangkit
Suralaya	1	Suralaya 1-4	4	200	371,5	301	Rp 4.289.140.046,84
	2	Suralaya 5-7	3	301	575,33333	301	
New Suralaya	3	New Suralaya	1	301	590	301	
Tanjung Jati	4	Tanjung Jati 1-2	2	412	660	412	
	5	Tanjung Jati 3-4	2	398	660	412	
Paiton PJB	6	Paiton 1-2	2	225	370	225	
Paiton PEC	7	Paiton 3	1	408	815	408	
Paiton JP	8	Paiton 5-6	2	305	610	305	
Paiton PEC	9	Paiton 7-8	2	302	615	408	
Paiton PLN	10	Paiton 9	1	301	615	301	
Gresik	11	Gresik	4	47,5	112,5	47,5	Rp 2.531.842.269
Grati	12	Grati	4	73,75	113,4375	73,75	
Muara Tawar 1	13	Muara Tawar 1	4	90	152,25	90	
Muara Tawar 2-4	14	Muara Tawar 2	2	80	135	80	
	15	Muara Tawar 3	3	80	140	80	
	16	Muara Tawar 4	3	80	140	80	
Muara Tawar 5	17	Muara Tawar 5	2	70	106	70	Rp 17.251.507
Cirata	18	Cirata	8	0	140	123,21918	
Saguling	19	Saguling	4	0	260	231,06164	
					TOTAL	10.176 MW	Rp 6.838.233.822,61

Tabel 4. 14 *Running* Skenario 6 (PULL-PULL)

GROUPING	P _i	NAMA BLOK	JUMLAH UNIT	P _{min} /unit	P _{max} /unit	P / unit	IDR/Pembangkit
Suralaya	1	Suralaya 1-4	4	200	371,5	200	Rp 4.169.879.697,16
	2	Suralaya 5-7	3	301	575,33333	301	
New Suralaya	3	New Suralaya	1	301	590	301	
Tanjung Jati	4	Tanjung Jati 1-2	2	412	660	412	
	5	Tanjung Jati 3-4	2	398	660	595,00001	
Paiton PJB	6	Paiton 1-2	2	225	370	225	
Paiton PEC	7	Paiton 3	1	408	815	408	
Paiton JP	8	Paiton 5-6	2	305	610	305	
Paiton PEC	9	Paiton 7-8	2	302	615	302	
Paiton PLN	10	Paiton 9	1	301	615	301	
Gresik	11	Gresik	4	47,5	112,5	47,5	Rp 2.531.842.269
Grati	12	Grati	4	73,75	113,4375	73,75	
Muara Tawar 1	13	Muara Tawar 1	4	90	152,25	90	
Muara Tawar 2-4	14	Muara Tawar 2	2	80	135	80	
	15	Muara Tawar 3	3	80	140	80	
	16	Muara Tawar 4	3	80	140	80	
Muara Tawar 5	17	Muara Tawar 5	2	70	106	70	Rp 19.520.000
Cirata	18	Cirata	8	0	140	140	
Saguling	19	Saguling	4	0	260	260	
				TOTAL	10.176 MW	Rp 6.721.241.966,09	

4.6.2 Formulasi Matrik Payoff

Formulasi matrik *payoff* dilakukan setelah nilai *payoff* dari setiap alternatif strategi diketahui. Matrik *payoff* distrukturisasikan dengan menggunakan model *strategic game* untuk dapat selanjutnya dicari nilai *equilibrium*nya. Nilai dalam matrik *payoff* diisi berdasarkan biaya yang diperoleh dari hasil *running* menggunakan *tool Solver* pada bahasan sebelumnya. Berikut merupakan matrik *payoff* dalam pengerjaan tugas akhir mengenai *economic dispatch*.

Tabel 4. 15 Matrik *Payoff* Permasalahan *Economic Dispatch*

		Pembangkit Batu Bara			
		Group		Pull	
Pembangkit Gas	Group	2.531.842.269	4.289.140.047	2.531.842.269	4.169.879.695
	TOP	1.303.087.500	4.289.140.047	1.303.087.500	4.169.879.695
	Pull	2.531.842.269	4.289.140.047	2.531.842.269	4.169.879.695

Bilangan yang ada dalam matrik *payoff* menyatakan *outcome* dari strategi permainan yang digunakan oleh setiap pemain. *Payoff* berwarna biru menyatakan milik pembangkit gas dan *payoff* berwarna merah menyatakan milik pembangkit batu bara.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

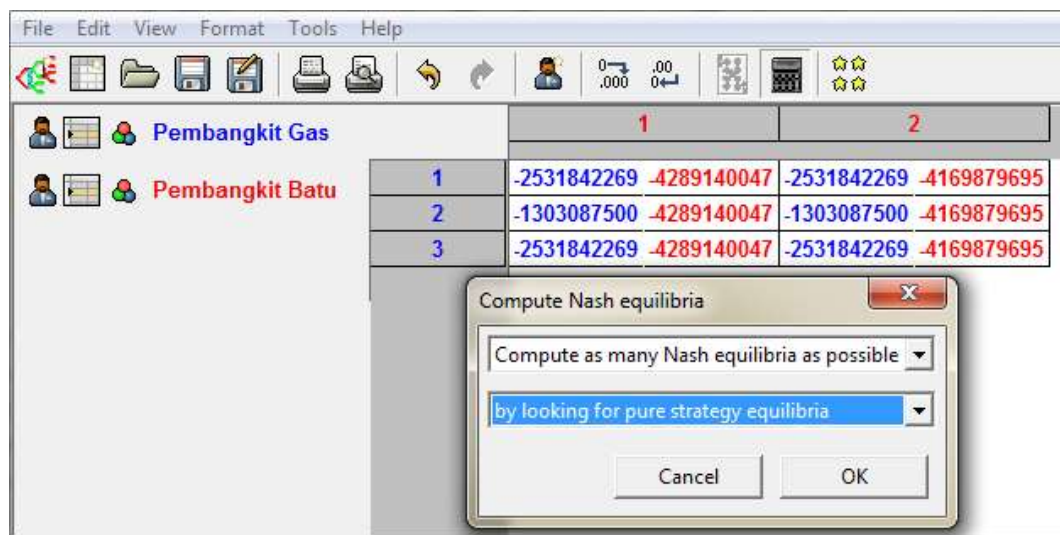
BAB 5

ANALISIS

Pada Bab Analisis, *game theory* diaplikasikan dengan tujuan mencari nilai *equilibrium* atau solusi optimal dengan tipe *game cooperative two-person non zero-sum game* untuk menganalisis hasil interaksi strategi dari beberapa *decision maker*. Analisis yang dilakukan meliputi tipe *equilibrium point* yang didapat dan dampak dari *equilibrium point* terhadap *value of the game*.

5.1 Analisis *Equilibrium Point*

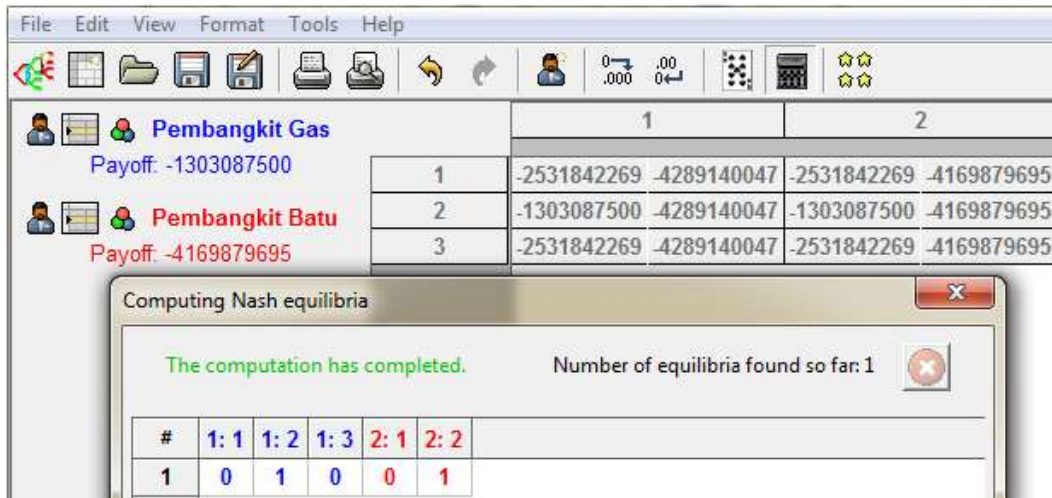
Setelah matrik *payoff* selesai diformulasikan, akan dilakukan analisis terhadap hasil *running* model *game theory* untuk mendapatkan *win-win solution* bagi pembangkit gas dan pembangkit batu bara. Analisis ini dilakukan dengan *software* Gambit. Cara mendapatkan *equilibrium point* adalah dengan menekan *icon* kalkulator, kemudian memilih kriteria *equilibrium point*. Berikut tampilan dari *software* Gambit.



Gambar 5. 1 Pengisian *Payoff* pada Gambit

Nilai yang dimasukkan diberi tanda *minus* (-) dikarenakan fungsi tujuan dari *economic dispatch* adalah minimasi. Dengan memilih kriteria *compute as many Nash equilibria as possible* dan opsi penyelesaian *by looking for pure strategy*

equilibria, maka solusi dari permasalahan *economic dispatch* dengan pendekatan *game theory* dapat diketahui. Berikut merupakan hasil *running* Gambit.



The screenshot shows the Gambit software interface. On the left, there are two players: 'Pembangkit Gas' with a payoff of -1303087500 and 'Pembangkit Batu' with a payoff of -4169879695. The main window displays a game tree with three nodes. The first node is a chance node (circle) with three branches labeled 1, 2, and 3. The second node is a player node (square) for 'Pembangkit Gas' with three branches labeled 1, 2, and 3. The third node is a player node (square) for 'Pembangkit Batu' with three branches labeled 1, 2, and 3. The terminal payoffs are listed in a table below the game tree.

	1	2
1	-2531842269	-4289140047
2	-1303087500	-4289140047
3	-2531842269	-4289140047

A dialog box titled 'Computing Nash equilibria' is open, showing the message 'The computation has completed.' and 'Number of equilibria found so far: 1'. Below this, a table shows the results of the computation:

#	1: 1	1: 2	1: 3	2: 1	2: 2
1	0	1	0	0	1

Gambar 5. 2 Hasil *Running* Gambit untuk Permasalahan *Economic Dispatch*

Berdasarkan hasil *running* Gambit, diketahui bahwa nilai *equilibrium* untuk permasalahan *economic dispatch* terletak pada kombinasi antara strategi S1.3 dan S2.2. *Equilibrium* diperoleh ketika pemain 1 yaitu pembangkit gas menerapkan strategi TOP dimana penentuan daya yang harus dibangkitkan disesuaikan dengan sistem *Take or Pay* dan pemain 2 yaitu pembangkit batu bara menerapkan strategi PULL dimana penentuan daya yang harus dibangkitkan disesuaikan dengan *demand* yang dibutuhkan. Ketika kondisi ini terjadi, *value of the game* yang ditanggung oleh pembangkit gas adalah sebesar Rp 1.303.087.500 dan pembangkit batu bara sebesar Rp 4.169.879.695 untuk membangkitkan daya dengan total *demand* sebesar 10.176 MW.

Nash equilibrium dalam *game theory* adalah *best respon* strategi ketika *player* yang lain menggunakan strategi tertentu. Dilihat dari sudut pandang pembangkit gas, keputusan yang diambil terkait dengan pemenuhan *demand* harus dapat meminimalkan total biaya pembangkitan dengan pertimbangan kontrak *Take or Pay* gas yang telah disepakati oleh pihak perusahaan. Keputusan strategi TOP yang diambil ini secara logika juga dianggap benar karena dengan menerapkan TOP pada pembangkit gas, kontrak yang telah disepakati akan berjalan dengan efisien secara operasional.

Dilihat dari sudut pandang pembangkit batu bara, keputusan yang diambil terkait dengan pemenuhan *demand* harus sesuai dengan *demand* yang dibutuhkan untuk dapat meminimalkan total biaya pembangkitan. Harga batu bara, biaya *setup*, efisiensi termal, dan karakteristik lain pada pembangkit batu bara yang berbeda-beda mengharapakan efisiensi dari penggunaan batu bara. Sehingga saat pembangkit gas menerapkan strategi apapun, total biaya pembangkitan yang ditanggung pembangkit batu bara bernilai sama, sehingga akan lebih diperoleh nilai minimum jika pembangkit batu bara dapat lebih efisien, yaitu membangkitkan daya sesuai *demand* yang dibutuhkan.

5.2 Perbandingan dengan Kondisi Eksisting

Biaya pembangkitan untuk kondisi eksisting adalah sebesar Rp 6.990.552.564. Biaya tersebut diperoleh dari pensubstitusian daya yang dibangkitkan berdasarkan hasil jROS ke dalam fungsi biaya yang telah diformulasikan sebelumnya. Jika dibandingkan dengan hasil *equilibrium point* yang menunjukkan angka sebesar Rp 5.492.487.194, terdapat selisih sebesar Rp 1.498.065.370. Dengan hasil biaya total pembangkitan yang lebih minimum dengan menerapkan strategi TOP untuk pembangkit gas dan strategi PULL untuk pembangkit batu bara dibanding kondisi eksisting, maka hasil komputasi tersebut dapat digunakan sebagai solusi untuk penyelesaian *economic dispatch* menggunakan pendekatan *game theory*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 6

KESIMPULAN

Pada bab kesimpulan berisi tentang kesimpulan hasil penelitian dan penelitian yang diharapkan selanjutnya.

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, berikut ini adalah kesimpulan yang dapat diambil:

1. Berdasarkan alternatif skenario pembebanan yang diformulasikan, didapatkan alokasi pembebanan pembangkit dengan biaya yang minimum yaitu skenario 1 sebesar Rp 6.838.002.317,97, skenario 2 sebesar Rp 6.721.241.963,69, skenario 3 sebesar Rp 5.609.247.546,81, skenario 4 sebesar Rp 5.492.487.194,76, skenario 5 sebesar Rp 6.838.233.822,61, dan skenario 6 sebesar Rp 6.721.241.966.
2. Keputusan yang dapat memberikan *win-win solution* antara pembangkit gas dan pembangkit batu bara terkait *economic dispatch* pada sistem kelistrikan Jawa Bali 500 kV adalah dengan menerapkan strategi TOP-PULL. Dengan pembangkit gas menentukan pembebanan sesuai sistem *Take or Pay* dan pembangkit batu bara menentukan pembebanan sesuai *demand* yang dibutuhkan, diperoleh biaya yang lebih minimum dengan sebesar Rp 1.303.087.500 untuk pembangkit gas dan sebesar Rp 4.169.879.695 untuk pembangkit batu bara serta terdapat penghematan biaya total pembangkitan sebesar Rp 1.498.065.370 jika dibandingkan dengan kondisi eksisting.

6.2 Saran Penelitian Selanjutnya

Berikut ini adalah beberapa hal yang diharapkan penulis untuk penelitian selanjutnya mengenai permasalahan *Economic Dispatch*:

1. Memperhitungkan adanya rugi-rugi (*losses*) transmisi dan distribusi sehingga sistem akan lebih merepresentasikan sistem alokasi pembangkitan sesungguhnya.

2. Sistem amatan juga mempertimbangkan daya yang dibangkitkan oleh sistem kelistrikan 150 kV dan 70 kV agar sistem lebih menyerupai sistem alokasi pembangkitan sesungguhnya.
3. Melakukan identifikasi variabel yang lebih lanjut untuk dapat membuat sistem lebih detail dan komprehensif
4. Memastikan kekonsistensian data-data yang diperoleh agar lebih memudahkan dalam pengolahan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, H. (2014). *Algoritma Simulated Annealing untuk Menyelesaikan Multi Objective Aggregate Production Planning*. Surabaya: ITS Surabaya.
- Aji, A. B. (2016). *Optimasi Economic Load Dispatch Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500kV dengan Ions Motion Optimization*. Surabaya: Tugas Akhir ITS.
- Amruddin, A. (2011). *Aplikasi Micro Genetic Algorithm untuk Penyelesaian Economic Dispatch pada Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV*. Surabaya: ITS Surabaya.
- Anesya, V. (2012). *Optimisasi Economic Dispatch pada Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV menggunakan Differential Algorithm*. Surabaya: ITS Surabaya.
- Farag, A., Al-Baiyat, S., & Cheng, T. (1995, May). Economic Load Dispatch Multiobjective Optimization Procedures Using Linear Programming Techniques. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(2), 731-738.
- Hazi, K., Rosmaliati, & Misbahuddin. (2014). Economic Dispatch Menggunakan Imperialist Competitive Agorithm (ICA) Pada Sistem Kelistrikan Lombok. *Dielektrika ISSN 2086-9487*, 63-68.
- Jaimes, A., Martinez, S., & Coello, C. (2009). *An Introduction to Multi Objective Optimization Technique*. Nova Science Publishers.
- Javidy, B., Hatamlou, A., & Mirjalili, S. (2015). Ions Motion Algorithm for Solving Optimization Problems. *Applied Soft Computing*, 72-79.
- Kanata, S. (2013, November). CFBPSO sebagai Solusi Economic Dispatch pada Sistem Kelistrikan 500 kV Jawa-Bali. *JNTETI*, 2(4), 280-286.
- Kumar, R., Sadu, A., Kumar, R., & Panda, S. (2012). A novel multi-objective directed bee colony optimization algorithm for multi objective emission constrained economic power dispatch. *Electrical Power and Energy Systems*, 1241-1250.
- Kumar, R., Sharma, D., & Sadu, A. (2010). A hybrid multi-agent based particle swarm optimization algorithm for economic power dispatch. *Electrical Power and Energy Systems*, 115-123.

- Mahatma, A. (2013). *Implementasi Algoritma Ant Colony Optimization untuk Menyelesaikan Permasalahan Dynamic Economic Dispatch dengan Memperhatikan Rugi-rugi Daya Transmisi dan Valve Effect*. Surabaya: ITS Surabaya.
- Miller, R. H., & Malinowski, J. (1994). *Power System Operation*. Singapore: McGraw-Hill International.
- Mulyati, M. (2008). PENETAPAN TARIF DASAR LISTRIK (TDL) UNTUK SEKTOR INDUSTRI DI INDONESIA. *Jurnal Teknik Industri*, Vol. 8 No.1.
- Munir, R. (2007). *Metode Analisa Numerik*. Bandung: Penerbit Informatika.
- Pandi, R., & Panigrahi, B. K. (2011). Dynamic economic load dispatch using hybrid swarm intelligence based harmony search algorithm. *Expert Systems with Applications*, 8509-8514.
- Penangsang, O. (2010). *“Diktat Kuliah Pengoperasian Optimum Sistem Tenaga Listrik*. Jurusan Teknik Elektro ITS Surabaya.
- PT PLN (PERSERO). (2015, Januari 12). RENCANA USAHA PENYEDIAAN TENAGA LISTRIK (RUPTL) PT PLN (PERSERO) 2015 - 2024. Jakarta, Jakarta, Indonesia.
- Rahman, M. F. (2012). *Optimisasi Pembebanan Pembangkit (Economic Dispatch) pada Sistem 500 kV Jawa Bali Menggunakan Particle Swarm Optimization dengan Mempertimbangkan Kapasitas Transmisi*. Surabaya: ITS Surabaya.
- Santosa, B., & Willy, P. (2011). *Metoda Metaheuristik: Konsep dan implementasi*. Surabaya: Guna Widya.
- Singh, N., & Kumar, Y. (2015). Multiobjective Economic Load Dispatch Problem Solved by New PSO. *Advances in Electrical Engineering*, 1-6.
- Tabucanon, M. T. (1988). *Multiple Criteria Decision Making in Industry*. Amsterdam: Elsevier.
- Wardana, R. (2014). *Implementasi Algoritma Particle Swarm Optimization untuk Menyelesaikan Permasalahan Dynamic Economic Dispatch dengan Memperhatikan Ramp Rate*. Surabaya: ITS Surabaya.
- Wood, A. J., & Wollenberg, B. F. (1996). *Power Generation Operation and Control, 2nd Edition*. New York: John Willey & Sons. Inc.
- Widodo, E., 2014. *Complementary Slackness Solution in Game Theory*. Surabaya.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Alfiyyah Azzah Melati, dilahirkan di Surabaya pada 19 April 1996, dan berdomisili di Sidoarjo. Penulis merupakan anak pertama dari empat saudara dengan orang tua bernama Bapak Mawar Mudjiono dan Ibu Cholidha Ulfy. Penulis telah menempuh pendidikan formal mulai dari SDN Kemiri (2001-2007), SMP Negeri 6 Sidoarjo

(2007-2010), SMA Negeri 1 Sidoarjo (2010-2013), dan Teknik Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya (2013-2017). Selama perkuliahan penulis aktif di berbagai kegiatan kemahasiswaan diantaranya menjadi staf Departemen Sosial Masyarakat BEM FTI ITS 2014/2015, menjadi kabinet PSDA UKM Cinta Rebana ITS 2015/2016, staf Departemen Syiar JMMI ITS 2015/2016, dan Sekretaris Departemen Kewirausahaan HMTI ITS 2015/2016. Penulis pernah melaksanakan kerja praktik di PT Pembangunan Jawa Bali Kantor Pusat pada bidang Manajemen Mutu dan Kinerja selama satu bulan. Selain kegiatan kemahasiswaan, penulis juga aktif dalam kegiatan mentoring/halaqoh/kajian untuk selalu *mengupgrade* diri dari sisi spiritual. Penulis dapat dihubungi via email alfiyyahazzahmelati@gmail.com